

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ДЕРЖАВНИЙ ВИЩИЙ НАВЧАЛЬНИЙ ЗАКЛАД  
"НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ"**



**Ю.Т. РАЗУМНИЙ**  
**В.М. ПРОКУДА**

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ МАГІСТРАЛЬНОГО  
КОНВЕЄРНОГО ТРАНСПОРТУ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ**

**Монографія**

Дніпро  
НГУ  
2018

УДК 622.5:621.3.072.8

Р 17

Рекомендовано до друку вченою радою Державного ВНЗ "Національний гірничий університет" (протокол № 2 від 13.02.2018).

Рецензенти:

*О. П. Чорний* – д-р техн. наук, проф., директор інституту електромеханіки, енергозбереження та систем управління Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського;

*В.М. Ставицький* – канд. техн. наук, доц., завідувач кафедри гірничої електротехніки і автоматики ім. Р.М. Лейбова Державного ВНЗ "Донецький національний технічний університет" (м. Красноармійськ).

**Разумний Ю.Т.**

**Р 17** Енергоефективність магістрального конвеєрного транспорту вугільних шахт [Електронний ресурс]: монографія / Ю.Т. Разумний, В.М. Прокуда ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Електрон. текст. дані. – Дніпро: НГУ, 2018. – 120 с. – Режим доступу: <http://nmu.org.ua> (дата звернення: 17.05.2018). – Назва з екрана.

ISBN 978–966–350–671–5

Викладено результати досліджень у сфері підвищення енергоефективності роботи магістрального конвеєрного транспорту вугільних шахт. Розроблено алгоритми та моделі, які дозволяють розрахувати питомі витрати електроенергії на транспортування вугля для різних технологічних умов функціонування конвеєрів.

Изложены результаты исследований в области повышения энергоэффективности работы магистрального конвейерного транспорта угольных шахт. Разработаны алгоритмы и модели, позволяющие рассчитать удельный расход электроэнергии на транспортировку угля для разных технологических условий функционирования конвейеров.

УДК 622.5:621.3.072.8

ISBN 978–966–350–671–5

© Ю.Т. Разумний, В.М. Прокуда, 2018  
© Державний ВНЗ "НГУ", 2018

## ПЕРЕДМОВА

До початку 50-х років рейковий локомотивний транспорт виконував практично весь комплекс внутришньошахтних перевезень. Однак цьому виду транспорту притаманний ряд недоліків: дискретність (переривчастість) дії, неможливість за допомогою локомотива подолання похилих межгоризонтних виробок, складність автоматизації (і, як наслідок, складність забезпечення ритмічної роботи), висока трудомісткість, необхідність прокладки рейок, проходка додаткових виробок для депо, місць для зарядних камер, навантажувальних кранів [1].

У міру вдосконалення техніки і концентрації очисних робіт процес вуглевидобутку ставав все більш інтенсивним і безперервним. Негативний вплив перелічених недоліків дискретного транспорту ставав все більш відчутним. Тому було вирішено виділити процес транспортування вугілля в окрему специфічну систему, оснащену безперервним видом транспорту – конвеєрами. Понад 70 % обсягів корисних копалин в шахтах з пологим заляганням пластів транспортується конвеєрними системами, які являють собою технологічний ланцюг послідовних ланок дільничного і магістрального транспорту, об'єднаних єдиним вантажопотоком. У вузлах між ланками відбувається пересип вантажу з конвеєра на конвеєр, а також з'єднання вантажопотоків, котрі динамічно змінюються, з декількох очисних вибоїв.

Переваги конвеєрного транспорту: поточність переміщення гірської маси; висока продуктивність конвеєрного транспорту (на вугільних шахтах 250–1200 т/ч при ширині стрічки 800–1200 мм); можливість підвищення на 25–30 % та більше продуктивності очисних комплексів; велика протяжність транспортування (до 3–15 км одним ставом конвеєра і 20–100 км конвеєрною лінією); можливість переміщення гірської маси під кутом до  $\pm 18$  град. Крім того, конвеєрний транспорт характеризується позитивними умовами для автоматизації та централізованого керування, зручністю сполучення з очисними забоями, високою надійністю, підвищеною безпекою і поліпшенням умов праці [1].

Тому з 50-х років минулого століття першочерговим завданням вугільної промисловості декількох п'ятирічок стала повна конвеєризація вугільних шахт. Доцільність такого рішення підтверджувалася багатьма дослідженнями [2–5]. Однак конвеєрний

транспорт, незважаючи на всі його переваги, виявився надалі проблемним в частині витрат електроенергії. Це пояснюється тим, що внаслідок складності пуску з вугіллям і високим ступенем готовності до прийняття вантажу конвеєрний транспорт не повинен зупинятися. Спостереженнями встановлено, що конвеєрний транспорт за період робочої зміни завантажується в повному обсязі, а іноді працює без навантаження, тобто у режимі холостого ходу. Такий стан зумовлює значні невиробничі витрати електроенергії, які перевищують нормативні у три рази.

Нині збільшилася довжина лав (досягає 300 м), потужність видобувного обладнання, відстань транспортування до декількох кілометрів, і як наслідок зросло питоме електроспоживання магістрального конвеєрного транспорту; з'явилися нові засоби підвищення енергоефективності, які встановлюють новий рівень мінімуму витрати електроенергії технологічними ланками вугільних підприємств [6–10].

Результати досліджень споживання електроенергії безконтактним електровозом з індукційною передачею енергії дозволяють знизити річні витрати електроенергії до 45 % в порівнянні з акумуляторним [11]. Основна сфера його застосування – це на шахтах з крутоспадними пластами при відпрацюванні їх поверховим способом, а недоліки такі, як і у акумуляторних.

Питанням підвищення енергоефективності системи внутрішньошахтного магістрального конвеєрного транспорту присвячено багато робіт. Наприклад, професори В.Т. Заїка запропонував модель визначення енергоефективності при нерегульованій швидкості руху конвеєрної стрічки, В.В. Ткачов займався автоматизацією нерегульованих конвеєрних ліній, Ю.Т. Разумний працював у сфері застосування шахтних акумуляуючих бункерів, Л.Г. Шахмейстер і С.А. Каріман встановили закони надходження вугільної маси з очисного вибою, Н.І. Стадник вивчав питання використання двигунів, котрі самовентилуються, В.Ф. Монастирський розраховував величину електроспоживання конвеєра зі зміною швидкості руху стрічки пропорційно вантажопотоку.

Для вирішення проблеми зниження витрат електроенергії в останні кілька років на вугільних шахтах України застосовують частотні перетворювачі енергії для регулювання швидкості руху стрічок магістрального конвеєрного транспорту, що забезпечує більш повне їх заповнення в умовах змінного вантажопотоку і зниження

питомих витрат електроенергії на транспортування вугілля. Швидкість руху конвеєрної стрічки встановлюється системою регулювання пропорційно вантажопотоку, проте в періоди відсутності вугілля конвеєрна стрічка рухається з мінімальною швидкістю без зупинки, що обумовлено складностями пуску з вантажем і вимогами постійної готовності до прийняття вантажу.

За узагальненими даними потенціал зниження витрат електроенергії на конвеєрному транспорті становить 40–50 %. Розрахунки показують, що впровадження перетворювачів частоти і систем регулювання швидкості руху стрічки дозволяє знизити витрату електроенергії на 28–35 % [12]. Умови режимів роботи конвеєрного транспорту, котрі змінилися, дозволяють встановити, що регулювання швидкості руху стрічки окремого конвеєра змінює статистичні характеристики вантажопотоку після нього і призводить до зміни швидкості руху стрічки наступних конвеєрів, а також до зміни величини їх електроспоживання.

Вплив різного характеру залежності електроспоживання від завантаження конвеєра, а також процес витрати електроенергії при використанні асинхронного регульованого приводу недостатньо досліджено. Як таких методів визначення потоку вугілля, що прямує з очисних вибоїв, без використання додаткових технічних засобів, таких як конвеєрні ваги і ультразвукові датчики, не існує.

Проведені дослідження і їх реалізація дозволяють додатково знизити витрату електроенергії на конвеєрному транспорті до 8–10 %.

Складну технологічну транспортну систему шахти автори пропонують уявити простим графом мережі. Однак з точки зору її функціонування вона має непрості властивості, які можна пояснити тим, що в ряді випадків магістральний конвеєр пропускає кілька вантажопотоків (два і більше).

Швидкість руху стрічки магістрального конвеєра повинна бути сегментована за умовами вузла надходження вантажів. Тільки для таких умов можна отримати результат щодо зниження витрат електроенергії. В іншому випадку максимальне зниження витрати електроенергії буде досягнуто тільки на ділянці магістрального конвеєра, що примикає до ділянки з регульованою швидкістю руху стрічки. Тому автори звертають увагу на необхідність раціонального розміщення перетворювачів частоти.

Автори розуміють, що матеріал роботи – це результати виконаних досліджень малої частини великої системи і не є завершеними.

Автори беруть на себе відповідальність продовжувати дослідження в цьому напрямку з метою надання наявних знань до об'єктивної реальності, а тому запрошуємо вчених і фахівців до співпраці.

У проведенні досліджень постійно допомагали колеги кафедр систем електропостачання, автоматизації комп'ютерних систем, електропривода Національного гірничого університету, а також працівники електромеханічної служби шахти «Павлоградська» ПрАТ ДТЕК «Павлоградвугілля». Особливу подяку автори висловлюють рецензентам монографії А.П. Чорному і В.М. Ставицькому.

Усі зауваження просимо надсилати за адресою: Україна, 49005, Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19, Національний гірничий університет.

З повагою автори.

# 1. ЕНЕРГЕТИКА СИСТЕМ КОНВЕЄРНОГО ТРАНСПОРТУ

## 1.1. Фактори, що впливають на витрату електроенергії

Магістральних стрічкових конвеєрів у шахті, як правило, налічується від десяти до тридцяти одиниць. Структура їх розташування може бути найрізноманітнішою і обумовлюється технологічним процесом видобутку вугілля. При одному вертикальному шахтному стовбурі структура розташування конвеєрів являє собою деревовидний граф, коріння якого знаходиться у головного стовбура. Конвеєри поділяються на похилі, що транспортують вантаж вгору, і бремсбергові, що транспортують вантаж униз.

На рис. 1.1 розглянута схема підземного конвеєрного транспорту шахти "Павлоградська" ПрАТ "ДТЕК Павлоградвугілля", з такими позначеннями: 1 – магістральні конвеєри; 2 – вузол транспортної схеми, де пересипається потік вугілля з одного очисного вибою; 3 – вузол транспортної схеми, в якому сходяться вугільні потоки з декількох очисних вибоїв.

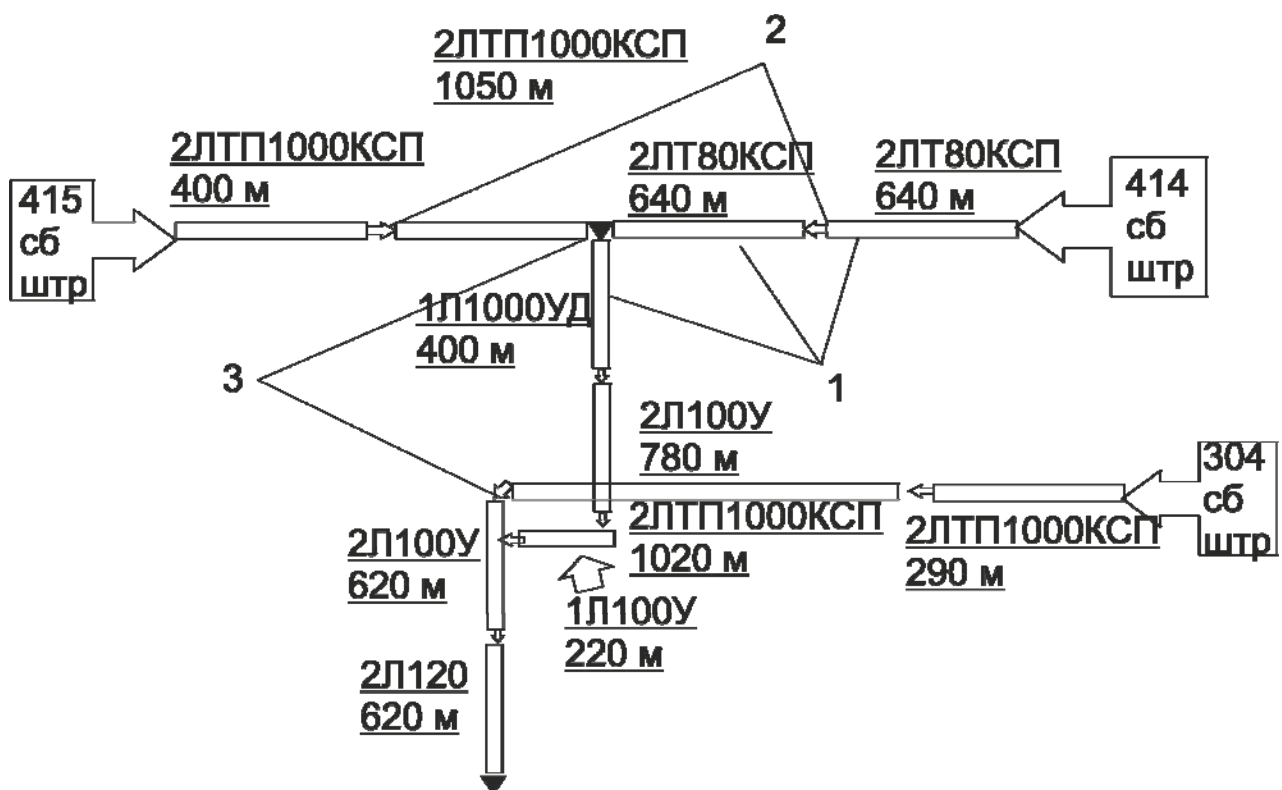


Рис. 1.1. Схема магістральних конвеєрних ліній шахти "Павлоградська"

За даними досліджень [13] потужними ланками технологічного комплексу вугільної шахти, на яких виявлено резерви зниження електроспоживання, є не тільки підземний транспорт, але і машини, і механізми очисних робіт, підіймальні установки, вентилятори головного провітрювання, а також водовідливні установки. Кожен з названих об'єктів має певні резерви підвищення енергоефективності при зміні режимів їх роботи. Однак за даними роботи [13], для шахт Західного Донбасу з пологими пластами, які відносяться до ПрАТ "ДТЕК Павлоградвугілля", споживання електроенергії (ЕЕ) підземним магістральним конвеєрним транспортом вугільної шахти становить близько 15 % від загальношахтного, а резерви зниження електроспоживання досягають 57 %. Інші енергоємні об'єкти мають частку в загальношахтному електроспоживанні 15–25 % кожен, проте їх резерви енергоефективності значно менші і складають 10–25 %, тобто конвеєрний транспорт володіє найбільшими резервами (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Витрата електроенергії технологічними  
ланками вугільної шахти [13]

Енергоємні технологічні ланки і установки на підземних гірничих роботах	Витрата ЕЕ на процес, % до загальношахтного	Резерв енергозбереження, % від фактичних витрат ЕЕ на процес	Зниження непродуктивної витрати ЕЕ на 50 ... 70 %, % до загальношахтного
Видобувні і прохідні ділянки	10,9	13...19 (в середньому – 15)	0,82...1,14
Магістральний конвеєрний транспорт	15,4	12...57 (в середньому – 34)	2,62...3,67
Водовідливний комплекс залежно від Н.О.	21,0	2,5...8 (в середньому – 3)	0,32...0,44
Разом	46,3	–	3,76...5,25

Резерви зниження електроспоживання на магістральному конвеєрному транспорті існують через певні особливості його функціонування як ланки в сукупному технологічному процесі видобутку і переміщення корисної копалини. Потенціал збільшення енергоефективності пов'язаний з нерівномірністю надходження вугілля з очисного вибою і існує на всіх конвеєрах транспортної мережі. До 60 % часу конвеєри працюють завантаженими, а за наявності вантажопотоку їх завантаженість становить 30–70 % [12]. У



той самий час значний обсяг електроенергії витрачається на переміщення рухомих частин самого конвеєра, що також підтверджується в фундаментальних роботах таких вчених, як Кузнецов Б.А. (Дніпропетровський гірничий інститут (ДГІ)) [14,15], Шахмейстер Л.Г. (Московський гірничий університет (МГУ)) [16–18], Кариман С.А. (Інститут гірничої справи (ІГС) ім. Скочинського) [19]. Технологічну базу для дослідження цієї проблеми та її складових створили Співаковський А.О., Гончаревич І.Ф., Дмитрієв В.Г. (МГУ), Монастырський В.Ф., Кірія Р.В. (Інститут геотехнічної механіки (ІГТМ) НАН України), Біліченко Н.Я. (Національна гірнича академія України (НГАУ)), а також Лейтес З.М., Сисоєва В.А., Гудалов В.П. (ІГС ім. Скочинського) та ін.

У переважній більшості випадків продуктивність стрічкових конвеєрів не відповідає сумарній продуктивності очисних комплексів і є завищеною, що пов'язано зі зміною топології системи шахтного конвеєрного транспорту. Завантаження конвеєра при цьому стає несуттєвим, що знижує коефіцієнт використання конвеєрів стосовно продуктивності [20]. Відомо [17, 21], що для досягнення мінімальних питомих витрат електроенергії необхідно, щоб продуктивність транспортної установки була близькою до номінальної, що фактично не виконується.

Аналіз літературних джерел [22–39] вказує лише на дві групи засобів, які можуть забезпечити зниження електроспоживання до 50 % (якщо не враховувати заміну фізично зношених деталей конвеєрів) на шахтному магістральному конвеєрному транспорті: установка додаткових рухомих або стаціонарних бункерів і зміна швидкості руху конвеєрної стрічки пропорційно вхідному вантажопотоку. Інші засоби зниження електроспоживання конвеєрних установок, наприклад, підвищення ККД електропривода, заміна муфт на більш сучасні, покращення пускових режимів шляхом упровадження пристроїв плавного пуску, використання нових типів стрічок та ін., збільшують термін служби рухомих частин конвеєра, але знижують споживання електроенергії лише на 1–5 % [16].

Будівництво нового додаткового стаціонарного гірського бункера, який не передбачений проектом при відпрацюванні пласта, є досить трудомістким і витратним заходом, що передбачає розширення штреку, проходку додаткових виробок, перенесення і додатковий монтаж конвеєрів. Установлення рухомого механізованого бункера передбачає розширення штреку,

застосування нового обладнання, заміну існуючих конвеєрів. У цьому випадку для вилучення резервів зниження електроспоживання від таких змін необхідно передбачити систему автоматизації, яка буде відслідковувати завантаженість бункера і передавати відповідну команду на включення/відключення конвеєра, встановленого в бункері, що викличе збільшення кількості пусків магістрального конвеєра і необхідність впровадження пристрою плавного пуску. При цьому швидкість руху стрічки конвеєра в процесі експлуатації не змінюється. Ці рішення також вимагають додаткових капіталовкладень і кваліфікованого обслуговування відповідних систем. Проблемі використання бункерів для підвищення енергоефективності транспортування гірської маси присвячені роботи [12,27,28]. У них розглянуті методики розрахунку усереднених, акумулюючих ємностей, питання автоматизації та автоматичного керування живильниками бункерів, а також досліджені закони розподілу гірської маси після виходу з бункера і при злитті потоків з декількох конвеєрів і очисних вибоїв.

Іншим заходом підвищення енергоефективності магістрального стрічкового конвеєрного транспорту є зміна швидкості руху конвеєрної стрічки, яку можливо реалізувати декількома способами. Перший – дискретна зміна швидкості за допомогою встановлення коробки передач до приводу двигуна. При цьому необхідно додавати елементи плавного розгону до поточної встановленої швидкості для збільшення терміну служби рухомих частин конвеєра. Цей спосіб знижує електроспоживання на 20–40 % і супроводжується складністю процесу автоматизації [16]. Другий – плавна зміна швидкості руху конвеєрної стрічки (рис. 1.2), яку можна реалізувати за допомогою встановлення перетворювача частоти напруги живлення до асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором або заміни його двигуном з фазним ротором і встановленням вентильного каскаду. Двигуни з фазним ротором на вугільному підприємстві не знайшли широкого застосування через об'єктивні причини – необхідність частого планового обслуговування і заміни щіток, що вимагає резервів часу і знижує надійність роботи установки. Тому у вугільній шахті широко використовуються двигуни з короткозамкненим ротором, а застосування асинхронного регульованого приводу є досить раціональним варіантом для підвищення енергоефективності. Впровадження асинхронного регульованого приводу дасть можливість не використовувати бункер і пристрій плавного пуску.

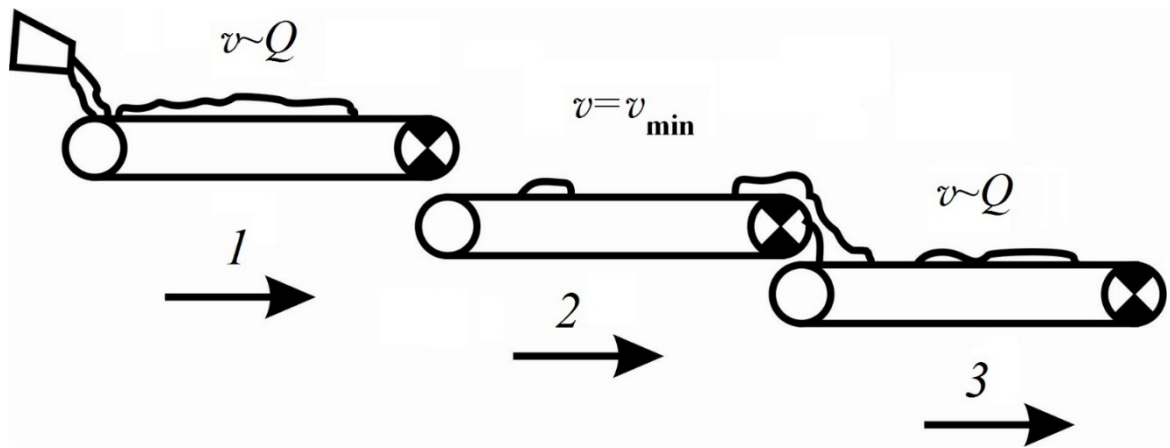


Рис. 1.2. Процес регулювання швидкості руху стрічки конвеєрів транспортного ланцюга пропорційно вхідному вантажопотоку: 1, 2, 3 – послідовно встановлені магістральні конвеєри;  $v$ ,  $v_{\min}$  – поточна і мінімальна швидкості конвеєра, м/с;  $Q$  – вантажопотік, т/ч

При плавній зміні швидкості руху конвеєрної стрічки пропорційно вхідному вантажопотоку навіть завищена продуктивність конвеєрної установки не відбивається на питомій витраті електроенергії. Пояснюється це тим, що співвідношення енергії, котра витрачається на транспортування вантажу, до енергії, яка витрачається на переміщення рухомих частин конвеєра, залишається незмінними. За відсутності регулювання швидкості руху стрічки активна енергія, яка витрачається на переміщення конвеєра з вантажем визначається як

$$\begin{aligned}
 W &= W_{xx} + W_{конв} = \frac{F_{xx} \cdot v \cdot t}{\eta} + \frac{F_{конв} \cdot v \cdot t}{\eta} = \\
 &= \frac{(F_{xx} + q_{насп} \cdot l \cdot g \cdot \omega \cdot K_3) \cdot v \cdot t}{\eta}, \text{ кВт} \cdot \text{ч},
 \end{aligned}
 \tag{1.1}$$

де  $\omega$  – коефіцієнт опору подовжньому руху стрічки конвеєра;  $W_{сп}$  – електроенергія, котра витрачається на транспортування вантажу стрічкою, кВт·год,  $W_{xx}$  – електроенергія, яка витрачається на переміщення рухомих частин конвеєра, кВт·год;  $F_{сп}$  – сила, яка необхідна для транспортування вантажу на стрічці, Н;  $F_{xx}$  – сила, яка необхідна для переміщення частин конвеєра;  $L$  – довжина конвеєра, м;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;  $\eta$  – ККД електропривода;  $q_{насп}$  – паспортна приймальна здатність конвеєра, кг/м;  $K_3$  –

коефіцієнт заповнення, що враховує фактичне завантаження конвеєра. При регулюванні швидкості руху стрічки пропорційно вантажопотоку витрата електроенергії розраховується так:

$$W = W_{xx} + W_{конв} = \frac{F_{xx} \cdot (v \cdot K_3) \cdot t}{\eta} + \frac{F_{конв} \cdot (v \cdot K_3) \cdot t}{\eta} =$$

$$= \frac{(F_{xx} + q_{насп} \cdot l \cdot g \cdot \omega) \cdot v \cdot t \cdot K_3}{\eta}. \quad (1.2)$$

У виразі (1.1) коефіцієнт  $K_3$  відображає зменшення доданка витрати електроенергії на переміщення рухомих частин конвеєра, а у виразі (1.2) – зменшення повної витрати електроенергії, що обґрунтовує доцільність регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки пропорційно вантажопотоку [16].

Аналіз ресурсозбереження при впровадженні частотного регульованого приводу [16] показує можливість збільшення терміну придатності роликкоопор до 3,5 разів, стрічки за критерієм зносу обкладок – до 4,5 разів.

## 1.2. Технічне забезпечення та системи керування

Технічними засобами, що дозволяють регулювати швидкість руху конвеєрної стрічки, є перетворювачі частоти живлячої напруги. Випускаються вони УкрНДІВЕ [40], а також БАРТЕК [41].

Перетворювачі частоти – типу ПЧВ-К У5 вибухозахищені призначені для регулювання швидкості обертання та захисту асинхронних короткозамкнених двигунів приводів гірничих машин сумарною потужністю до 500 кВт. Працюють вони в комплекті з апаратурою керування стрічковими конвеєрами в умовах вугільних шахт, у тому числі небезпечних за газом та пилом і забезпечують:

- плавний пуск і регулювання частоти обертання приводного двигуна;
- автоматичну підтримку заданої продуктивності конвеєра шляхом зниження швидкості руху стрічки з метою економії електроенергії.

Перетворювачі частоти – типу DYNAVERT VSD-1140V вибухозахищені і служать для безперервного регулювання швидкості обертання трифазних електродвигунів у гірничій вугільній

промисловості при підземному видобутку вугілля. Розраховані вони на номінальну потужність електродвигунів 250 – 500 кВт, застосовуються переважно для індивідуального приводу з електричним гальмуванням та зміною напрямку обертання, працюють в мережі з напругою 1140 В. Згадані перетворювачі за паспортними даними забезпечують ККД 98 % і зміну частоти напруги живлення двигуна в межах от 10 до 100 %. Вони переважно застосовуються на шахтах України і Німеччини.

Таким чином, сутність вирішення проблеми підвищення енергоефективності полягає у впровадженні засобів регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки – перетворювачів частоти з ланкою постійного струму. Додатковими технічними засобами є такі прилади ідентифікації вантажопотоку: конвеєрні ваги, ультразвукові або механічні датчики, з'єднані із системою керування швидкістю руху конвеєрної лінії. Система керування встановлює швидкість руху конвеєрної стрічки пропорційно вхідному вантажопотоку в періоди роботи очисного вибою, і стрічка заповнюється на максимально можливий рівень по довжині.

Однак регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки при наявних паузах у надходженні вугілля з очисного вибою не дозволяє реалізувати весь потенціал зниження витрат електроенергії. Особливістю режимів роботи конвеєрного транспорту є безупинна робота конвеєрів: транспортна система завжди повинна бути готова до прийняття вантажу, а запуск конвеєрів здійснюється в порядку, зворотному напрямку транспортування вантажу [42,43]. Швидкість руху стрічки конвеєра можна лише знижувати. Тому за відсутності вхідного вантажопотоку система регулювання встановлює мінімальну швидкість – 10–25 % від номінальної. Межа мінімальної швидкості обумовлюється режимом самообдуву вибухозахищеного двигуна [44,45]. При такому принципі регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки енергія, що витрачається на переміщення вантажу за тривалий період часу, залишається незмінною, а енергія, необхідна для переміщення рухомих частин конвеєра, знижується, причому величина зниження залежить від характеристик вхідного вантажопотоку: тривалості інтервалів його відсутності і наявності, обсягів надходження і хвилинних значень. У той самий час при установленні засобів регулювання швидкості руху стрічки на кількох конвеєрних установках, за допомогою яких транспортується один і той самий вантаж, кожен конвеєр з регульованою швидкістю руху

стрічки змінює статистичні характеристики потоку (рис. 1.3). Це відбувається внаслідок змінної транспортної затримки переміщення вантажу при регулюванні швидкості руху стрічки згідно з описаним принципом, що впливає на витрату електроенергії при нелінійному характері залежності електроспоживання від завантаження [17, 46] подальших конвеєрів. Рис. 1.3 отримано на імітаційній моделі, розглянутій в розд. 4, однак висновок про зміну статистичних характеристик потоку конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки наведено в роботі [16].

Дослідженню підвищення енергоефективності конвеєрів шляхом регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки присвячено роботи, що будуть аналізуватися нижче.

Так, в роботах [23, 30] розглянуті питання витрати електроенергії при транспортуванні насипних вантажів стрічковими конвеєрами. Для горизонтального конвеєра показано, що при регулюванні швидкості руху стрічки в разі зменшення продуктивності конвеєра в 2 рази споживана приводом потужність зменшується приблизно на 26 %. Однак залежність величини електроспоживання від вантажопотоку для стрічкового конвеєра при регульованій швидкості руху стрічки не встановлена.

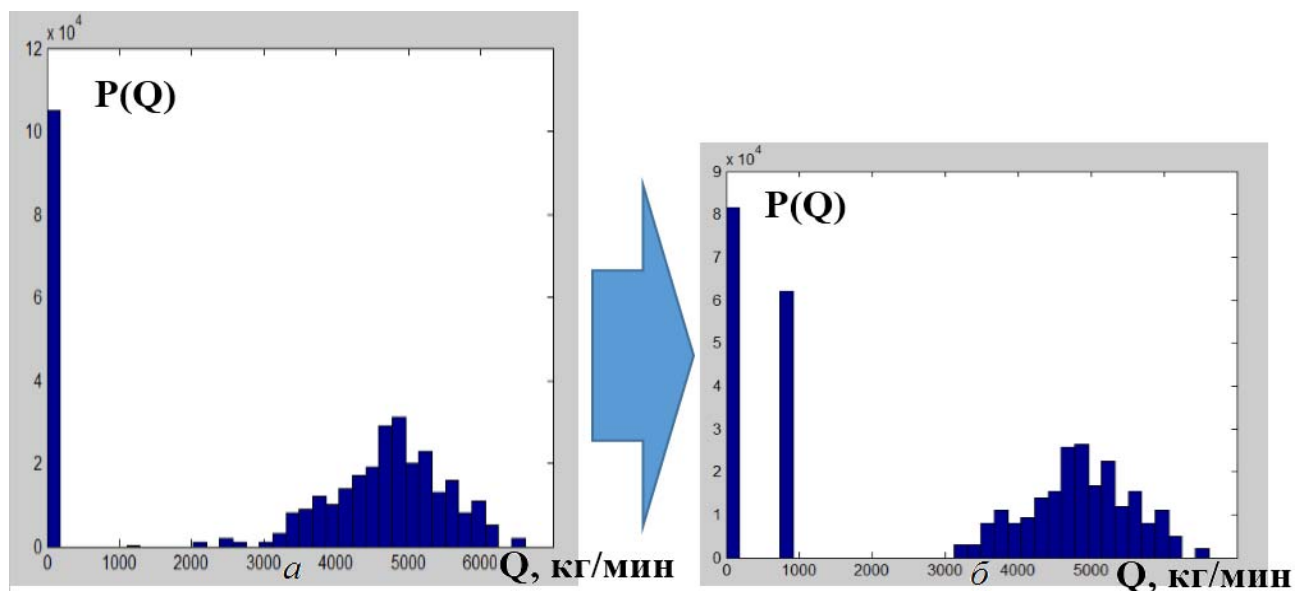


Рис. 1.3. Діаграма щільності ймовірності вантажопотоку для конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки (а) та після нього (б)

У роботі [47] наведені результати аналізу факторів, що впливають на динаміку транспортування вантажів стрічковим конвеєром. Обґрунтовано методику визначення транспортної

затримки і запропонований алгоритм її розрахунку, який може бути використаний при моделюванні роботи стрічкових конвеєрів, а також при розробці цифрового адаптивного регулятора для системи автоматичної стабілізації навантаження електропривода. Процес транспортної затримки стрічкового конвеєра розглянуто в роботі [48].

У роботах [44,49] проаналізовані можливості використання двигунів, що самовентилуються, при експлуатації стрічкових конвеєрів з регульованою швидкістю руху стрічки. Показано, що найбільш ефективним технічним рішенням, що забезпечує адаптацію швидкості руху стрічки конвеєра під фактичні вантажопотоки, є застосування регульованого приводу. Межі зміни діапазону регулювання швидкості – від 3,2:1 до 6,3:1, при цьому нижня межа регулювання – «повзуча» швидкість 0,5 м/с. У той самий час вказується, що при достатньому запасі потужності двигуна діапазон регулювання можна збільшувати. Можливе застосування електродвигунів серій 2ВР, 3ВР и ВАО2 для комплектації частотно-регульованого електропривода, що підтверджено в роботі [45].

Динаміка вантажопотоків є фактором, що впливає на завищену більш ніж у два рази витрату електроенергії конвеєрів через низьку ефективність використання конвеєрних ліній [50,51]. У літературних джерелах [16,18,19] наведені статистичні характеристики процесу надходження вугілля з очисного вибою  $Q(t)$  і зроблено висновок про стаціонарність процесу  $Q'(t)$ , в якому виключені проміжки відсутності вантажу. Безперервна частина вантажопотоку, що надходить з очисного вибою на транспортну систему, апроксимується випадковою функцією з розподілом миттєвих значень продуктивності за близьким до нормального або логарифмічно нормального закону. В роботі [18] наведено алгоритм розрахунку на ЕОМ процесу надходження вугілля з очисного вибою на стрічку конвеєра. Виконаний аналіз дозволив встановити, що існуючі моделі і методики для визначення ймовірнісних законів розподілу вантажопотоків у вузлах системи конвеєрного транспорту не прийнятні для використання за умови застосування регулювання швидкості руху стрічки для магістрального конвеєрного транспорту.

Дослідження в частині встановлення законів статистичного розподілу вантажопотоку виконані для умов роботи конвеєрів без перетворювачів частоти напруги живлення. Слід зазначити, що на очисних комплексах застосовують перетворювачі частоти, які також можуть вносити деякі зміни у вантажопотік з очисних вибоїв.

В роботі [52] статистично проаналізовані результати вимірювань, виконаних співробітниками Дондіпровуглемаш, вантажопотоку і витрати електроенергії стрічковим конвеєром сучасної шахти на прикладі конвеєра 2ЛУ120, встановленого горизонтально. В результаті було доведено адекватність лінійної регресійної залежності потужності приводу від маси матеріалу на конвеєрі, що підтверджує відсутність залежності коефіцієнта опору руху стрічки від погонної маси вантажу на стрічці при роботі в шахтних умовах для горизонтальних конвеєрів.

Однак виявляється складність в отриманні даних витрат електроенергії магістральних конвеєрів шахт Західного Донбасу. Сьогодні застосовуються або знаходяться в розробці системи, що дозволяють здійснювати вимірювання і облік витрат електроенергії: УТАС, БЗУ-2, САУКЛ, СЕУПЕШ.

УТАС – це уніфікована телекомунікаційна система диспетчерського контролю та автоматизованого керування гірничими машинами і технологічними комплексами. Сигнали про стан гірничих машин, механізмів, устаткування та параметри рудникової атмосфери надходять на програмовані контролери системи від датчиків, встановлених як в шахті, так і на поверхні. Програмовані контролери приймають і аналізують сигнали датчиків. При перевищенні показників датчиків значень заданих уставок контролера подаються команди на включення сигналізації, відключення ГШУ (гірничо-шахтного устаткування) і електроенергії, а також поточна інформація про стан ГШУ і параметри рудникової атмосфери за цифровим каналом зв'язку в диспетчерську. Залежно від ситуації диспетчер посилає команди, які передаються на контролери ГШУ, встановлені як під землею, так і на поверхні для виконання функцій керування [53]. Однак система зараз перебуває в стані доопрацювання.

Блок керування і захисту БЗУ-2-05-О призначений для управління високовольтними вимикачами комірок КРУВ-6ВМ-ОВ, КРУРН-6А або аналогічними за призначенням для ліній, що відходять, індикації реального часу, величини напруги на вводі, величини споживаного навантаження струму, потужності, витрати електроенергії (некомерційний облік), здійснення функцій захисту [54]. Однак блоки БЗУ-2 мають низьку надійність і належним чином не відкалібровані в місцях установлення.

Система автоматизованого керування розгалуженими конвеєрними лініями (САУКЛ) забезпечує керування лініями з



числом конвеєрів до 60 і необмеженою кількістю відгалужень. У складі конвеєрної лінії можуть бути стрічкові і скребкові конвеєри з числом двигунів до чотирьох і з нерегульованою швидкістю робочого органа [55]. Дана система дозволяє отримувати інформацію про витрату електроенергії конвеєрними лініями, проте на шахтах Західного Донбасу поки що не застосовується.

Система енергомоніторингу та управління електропостачанням (СЕУПЕШ), яка розробляється науковцями ДВНЗ «НГУ», створюється на базі сучасних комп'ютерних технологій з використанням досвіду, основних ключових моментів та ідей попередніх розробок – системи КТС СОЕ і системи автоматизованого управління конвеєрними лініями (САУКЛ). СЕУПЕШ забезпечує енергоконтроль і автоматизоване керування високовольтними КРП типу КРУВ-6 (УК-6) [56]. Система знаходиться на стадії розробки.

Виходячи з поточного стану систем обліку витрати електроенергії на магістральному конвеєрному транспорті робимо висновок, що отримати достовірну інформацію про електроспоживання магістральних конвеєрних установок вугільних шахт не видається можливим.

Величину витрати електроенергії магістральними стрічковим конвеєрами також можливо отримати в результаті виконання тягового розрахунку відповідно до роботи [14] і урахування технологічних особливостей стрічкового конвеєра. Однак у методиці спрощеного тягового розрахунку використовують узагальнений коефіцієнт опору  $\omega$  руху конвеєрної стрічки і роликів. Відповідно до джерел [13, 17] він варіюється в широких межах від 0,04 до 0,08. У роботі [17] наводяться результати експериментів визначення коефіцієнтів опору руху частин конвеєра при різному ваньажопотоці. Доведено, що складові коефіцієнта  $\omega$  – це опір коченню роликів, опір вдавнення роликів у стрічку та опір від зміни натягу стрічки – приймають різні значення залежно від швидкості руху стрічки до швидкостей менше 3,15 м/с. Наводиться залежність коефіцієнта опору руху конвеєрної стрічки від натягу, який в свою чергу залежить від багатьох факторів [17]. З аналізу літературних джерел випливає, що для конвеєрів з конкретними умовами установки (кут установки, довжина ставу, маса стрічки, маса рухомих частин, умови запиленості середовища) коефіцієнт опору руху верхньої гілки стрічки змінюється незначно залежно від погонного навантаження, а коефіцієнт опору руху нижньої гілки постійний. В роботі [57]

доведено, що коефіцієнт опору руху стрічки з вантажем при збільшенні натягу стрічки конвеєра зменшується, а при збільшенні жорсткості, швидкості і в'язкості стрічки, а також вантажу зростає. При цьому коефіцієнт опору не залежить від погонного навантаження і мало залежить від відстані між роликоопорами.

При дослідженні енергоефективності конвеєрних ліній окремий інтерес являють бремсбергові конвеєри, здатні при досягненні певного завантаження переходити в рекуперативний режим роботи. У джерелі [46] кут установки конвеєра  $-6^\circ$  визначається як граничний, більш якого привід конвеєра може переходити в рекуперативний режим роботи. При цьому ККД у межах області рекуперації – це нелінійна залежність потужності конвеєра від маси вантажу на ньому. Оскільки шахтні магістральні конвеєри мають велику протяжність і час транспортування, котрий, як правило, перевищує період автокореляції вантажопотоку, то час роботи конвеєрів у тяговому і рекуперативному режимах вимагає додаткового аналізу при врахуванні зміни характеристик вантажопотоку конвеєрами з регульованою швидкістю руху стрічки.

У роботі [13] встановлено, що питоме електроспоживання конвеєра може варіюватися в широких межах: розкид індивідуальних значень досягає 20 % при одному і тому ж змінному вантажопотоці. Це викликано нерівномірністю надходження вантажу з очисного вибою. Так, наприклад, в роботі [58] експериментально отримано, що питоме електроспоживання бремсбергового конвеєра 1л100к (шахта ім. Н.І. Сташкова) змінювалося від 0,75 до 0,92 кВт·год/т·км при добовому вантажопотоці 2000 т. Таким чином, характеристики процесу надходження гірської маси з очисного вибою безпосередньо впливають на енергоефективність процесу її транспортування системою магістральних стрічкових конвеєрів, що підтверджується в літературних джерелах [59, 33]. Для отримання точних оцінок витрати електричної енергії необхідний інструмент для визначення значень вантажопотоків за короткий період часу, близький до хвилини, що обґрунтовується періодом автокореляції вантажопотоку [16]. Автокореляція – статистичний взаємозв'язок між послідовностями величин одного ряду, взятими із зсувом за часом для випадкового процесу. Для цього в блок вводяться значення математичного сподівання і дисперсії вантажопотоку під час його надходження, а також коефіцієнт машинного часу очисного вибою. При нелінійній залежності величини електроспоживання від маси

вантажу на конвеєрі доведено [17], що при розміщенні вугілля на стрічці, який надійшов за кілька періодів автокореляції, необхідно враховувати інтегральну масу вантажу на конвеєрі для визначення витрати електроенергії. Для адекватності оцінки енергоефективності конвеєрів необхідно розробити модель, яка враховує хвилинні значення вантажопотоків.

Однак існують складності в отриманні точних даних по кожному конвеєру і застосовуваних типах роликкоопор і стрічок. У роботах проф. В.Т. Заїки на основі даних натурних експериментів [58] були встановлені регресійні моделі визначення залежності споживання електроенергії від вантажопотоку при нерегульованій швидкості руху конвеєрної стрічки [13]. Переходячи від питомого електроспоживання до коефіцієнта опору, можна використати цей коефіцієнт для подібних (з ідентичними масами рухомих частин, кутами установки і умовами запиленості середовища) конвеєрів в умовах шахт Західного Донбасу.

### **1.3. Напрямки зниження витрат електроенергії**

Засоби обліку витрати електроенергії в підземній шахтній мережі відсутні або не відкалібровані, що не дає можливості виконати оцінку енергоефективності шахтних конвеєрів.

Для визначення поточної витрати електроенергії конвеєром, а також встановлення ймовірного його значення за тривалий період часу необхідна ідентифікація маси вантажу, що надходить на конвеєр за інтервал часу, близький до періоду автокореляції вантажопотоку. Для досягнення мети необхідно розробити підходи для визначення величини вантажопотоку, що прямує з очисного вибою. На жаль, у даний момент відсутні моделі визначення статистичних характеристик вантажопотоків у вузлах розгалуженої транспортної системи, а також визначення її енергоефективності при використанні асинхронного регульованого приводу. Однак є передумови до уточнення законів розподілу вантажопотоків при використанні частотних перетворювачів електроенергії на магістральних конвеєрах з подальшою розробкою моделей визначення електроспоживання конвеєрів з регульованою швидкістю руху стрічки.

Метою даної роботи є зниження витрат електроенергії магістральним конвеєрним транспортом вугільних шахт з урахуванням динаміки надходження вантажу. Для цього необхідно

встановити закономірність надходження вугільної маси з видобувного вибою за період її автокореляції від величини електроспоживання очисного комплексу, а також встановити закономірності зміни витрат електроенергії магістральним конвеєрним транспортом при нелінійні залежності електроспоживання від маси вугілля на конвеєрі. На базі встановлених закономірностей розробити математичну модель зміни надходження вугільного потоку з урахуванням регулювання швидкості руху стрічки конвеєра. Надалі проаналізувати роботу магістрального конвеєрного транспорту вугільної шахти при регулюванні швидкості руху стрічки конвеєрів і визначити поєднання параметрів, енергоефективних за критерієм мінімальної питомої витрати електроенергії. Усі ці непрості рішення розглянуті в наступних розділах.

## **2. ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОНВЕЄРНИХ УСТАНОВОК БЕЗ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ СТРІЧКИ**

### **2.1. Обґрунтування критерію енергоефективності роботи конвеєрного транспорту**

Ефективність роботи конвеєрного транспорту визначається декількома параметрами: кутом установлення става, масою рухомих частин і стрічки, умовами роботи (запиленістю середовища) і масою перевезеного вантажу. Перелічені механічні характеристики визначаються згідно з галузевими стандартами України (СОУ і ОСТ) [60,61] і можуть впливати на енергоефективність під час вибору конвеєра. Маса і закони надходження вугілля впливають на енергоефективність у процесі експлуатації конвеєра.

За критерій енергоефективності корисної роботи, яку здійснюють конвеєром щодо переміщення вантажу на відстань, рекомендується приймати питоме електроспоживання, кВт·год/(т·км). Однак цей критерій не відображає особливості функціонування конкретної конвеєрної лінії: наприклад, якщо один конвеєр працює на ухил, а інший на бремсберг, то питома витрата електроенергії у них відповідно буде різною при одному і тому ж обсязі перевезеного вантажу і однакових умовах запиленості середовища. Тому при визначенні ефективності витрати електроенергії тим чи іншим конвеєром необхідно зводити їх до загальних умов роботи і враховувати особливості експлуатації.

У роботі [62] наводяться питомі норми споживання електроенергії конвеєрним транспортом на рівні 0,4–0,6 кВт·ч/т·км. При цьому ці норми не враховують кут установлення конвеєрів, запиленість середовища і нерівномірність вантажопотоку. Аналіз фактичних даних [12], отриманих в результаті проведеного експерименту для типової шахти Західного Донбасу, дозволив встановити, що наведені нормативні показники питомої витрати електроенергії є правомірними при дотриманні таких умов: постійне надходження вугілля на конвеєр (заповнення стрічки близько до 100 %), кут установлення конвеєра дорівнює 0°, запиленість середовища відповідає значенням коефіцієнта опору руху частин конвеєра і знаходиться в межах 0,04–0,06.

Однак у реальних умовах вантаж надходить дискретно, а конвеєр працює без зупинки і зниження швидкості руху, внаслідок чого питома витрата електроенергії зростає зі збільшенням кількості і тривалості пауз в процесі надходження вугілля. Наприклад, для конвеєра 2ЛТП1000КСП питома витрата електроенергії при швидкості руху стрічки 2 м/с збільшиться в 1,5 раза, якщо вантажопотік буде відсутній близько 50 % часу, і в два рази, якщо потік вугілля буде відсутній 70 % від загального часу роботи конвеєра.

Для оцінки енергоефективності роботи конвеєрів наведемо умови їх роботи до загальних з метою визначення резерву зниження електроспоживання. Використовуємо тяговий розрахунок, в якому враховуються технічні параметри роботи конвеєра й умови його встановлення. Тягове зусилля конвеєра згідно з джерелом [18]

$$F_{\text{полн}} = F_{1-2} + F_{3-4} = l \cdot g \cdot (q_{\text{зр}} + q_{\text{л}})(c' \cdot \omega \cdot \cos \beta + \sin \beta) + l \cdot g \cdot q'_{\text{р}} \cdot \omega + \\ + l \cdot g \cdot q_{\text{л}} \cdot (c' \cdot \omega \cdot \cos \beta - \sin \beta) + l \cdot g \cdot q''_{\text{р}} \cdot \omega = l \cdot g \cdot q_{\text{зр}} \cdot (c' \cdot \omega \cdot \cos \beta + \sin \beta) + (2.1) \\ + 2 \cdot l \cdot g \cdot q_{\text{л}} \cdot c' \cdot \omega \cdot \cos \beta + l \cdot g \cdot \omega \cdot (q'_{\text{р}} + q''_{\text{р}}) = F_{\text{зр}} + F_{\text{хх}},$$

де  $q''_{\text{р}}$ ,  $q'_{\text{р}}$ ,  $q_{\text{л}}$  – погонне маса нижніх, верхніх роликкоопор і стрічки, т/км;  $c'$  – коефіцієнт, що враховує додаткові опори в місцях завантаження;  $\omega$  – коефіцієнт опору подовжньому руху стрічки конвеєра;  $\beta$  – кут установлення конвеєра, град;  $F_{\text{полн}}$  – зусилля, котре необхідне для переміщення стрічки конвеєра з вантажем, Н;  $F_{3-4}$  – зусилля, яке необхідне для переміщення верхньої гілки, Н;  $F_{1-2}$  – зусилля, котре необхідне для переміщення нижньої гілки, Н;  $F_{\text{зр}}$  – зусилля, яке необхідне для транспортування вантажу стрічкою, Н;  $F_{\text{хх}}$  – зусилля, котре необхідне для транспортування самої стрічки, Н.

У виразі (2.1) перша частина суми відноситься до визначення зусилля на транспортування вантажу, друга – до визначення зусилля на переміщення рухомих частин конвеєра. Введемо поняття мінімально досяжного холостого ходу конвеєра: це відношення величини зусилля, яке необхідно для переміщення рухомих частин самого конвеєра, до сумарної величини зусилля, необхідного для переміщення рухомих частин і вантажу на конвеєрі. При розрахунку цього показника приймаємо, що вантаж заповнює усю стрічку згідно з паспортною прийнятною здатністю. Позначимо мінімально досяжний холостий хід конвеєра як  $E_{\text{конв}}$  та запишемо,

$$E_{\text{конв}} = \frac{F_{xx}}{F_{\text{гр\_макс}} + F_{xx}} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

де  $F_{\text{гр\_макс}}$  – зусилля, необхідне для транспортування вантажу на конвеєрі, заповненого максимально виходячи з його габаритів, Н. Відзначимо, що мінімально досяжний холостий хід не залежить від швидкості руху стрічки конвеєра. Величину  $E_{\text{конв}}$  визначаємо при куті  $\beta = 0$ , оскільки в цьому разі вона не залежить від опорів руху стрічки.

Розглянемо три типи конвеєрів, котрі характеризуються різними значеннями ширини стрічки і масою рухомих частин. Для розрахунку приймаємо такі початкові умови:  $l = 1000$  м,  $\beta = 0^\circ$ ,  $c' = 1,1$ ,  $\omega = 0,08$ . Визначимо для кожного типу конвеєра величину  $E_{\text{конв}}$  і зведемо результати в табл. 2.1

Таблиця 2.1

Дані для визначення мінімально досяжного холостого ходу для трьох типів конвеєрів

Тип конвеєра	Параметри конвеєра			ПП*	Розрахункові зусилля			
	$q_l$ , кг/м	$q_p'$ , кг/м	$q_p''$ , кг/м	$q$ , кг/м	$F_{\text{гр}}$ , Н	$F_{1-2}$ , Н	$F_{3-4}$ , Н	$F_0$ , Н
2ЛУ120	18	26,7	12,5	133,3	86328	19747,5	28919	48667,4
2ЛТП1000КСП	15	20,0	9,2	94,4	61149	15647,0	22661	38308,1
2ЛТ80КСП	12	20,0	9,2	56,7	36689	13704,6	20718	34423,3

ПП\* – погонна приймальна здатність.

Продовження табл. 2.1

Продовження

Тип конвеєра	Холостий хід		Питома витрата електроенергії	
	Мінімально досяжний	Фактичний	Мінімально досяжний	Фактичний
	$E_{\text{конв}}$ , %	%	$w_{\text{уд}}$ , кВт·ч/т·км	$w_{\text{уд}}$ , кВт·ч/т·км
2ЛУ120	36	43	0,42	0,59
2ЛТП1000КСП	39	68	0,44	1,58
2ЛТ80КСП	48	70	0,54	1,37

З табл. 2. 1 випливає, що величина зусилля при холостому ході (в % від номінального) і максимальному заповненні стрічки менше у

конвеєра з великими габаритами і прийнятною здатністю. При цьому фактична питома витрата електроенергії може перевищувати мінімально досяжний більш ніж у два рази (см. 2ЛТП1000КСП, 2ЛТ80КСП), що викликано впливом динаміки вантажопотоків.

Електроенергія, що витрачається під час переміщення відповідно рухомих частин конвеєра  $W_{xx}$  та вантажу  $W_{zp}$  визначається так:

$$W_{xx} = \frac{F_{xx} \cdot v \cdot t}{\eta}; \quad (2.3)$$

$$W_{zp} = \frac{F_{zp} \cdot v \cdot t}{\eta}, \quad (2.4)$$

де  $v$  – швидкість руху стрічки конвеєра, м/с;  $t$  – інтервал часу для визначення витрати електроенергії  $W_{zp}$  і  $W_{xx}$ , с;  $\eta$  – механічний ККД, який враховує ККД приводу.

За час  $t$  конвеєр транспортує вантаж масою

$$Q_{y\partial\_t} = l \cdot q_{zp} \cdot t \cdot v, \quad (2.5)$$

де  $l$  – довжина конвеєра, м,  $q_{zp}$  – погонна маса вантажу, т/км.

Величина питомого електроспоживання на транспортування вантажу конвеєром

$$w_{y\partial} = (W_{zp} + W_{xx}) / Q_{y\partial\_t}. \quad (2.6)$$

З виразів (2.1) – (2.5) визначимо питомі енерговитрати на транспортування вантажу без урахування ваги стрічки і роликоопор, тобто

$$w_{zp\_y\partial} = W_{zp} / Q_{y\partial\_t}, \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} w_{zp\_y\partial} &= \frac{F_{zp} \cdot v \cdot t}{\eta} / Q_{y\partial\_t} = \frac{l \cdot g \cdot q_{zp} \cdot (c' \cdot \omega \cdot \cos \beta + \sin \beta) \cdot v \cdot t}{\eta} / (l \cdot q_{zp} \cdot v \cdot t) = \\ &= \frac{g \cdot (c' \cdot \omega \cdot \cos \beta + \sin \beta)}{\eta \cdot 3,6}. \end{aligned} \quad (2.8)$$



Як видно з виразу (2.8) питоме електроспоживання залежить від опору руху самих частин (умов роботи і запиленості середовища  $\omega$ ) і кута встановлення конвеєра.

Встановимо залежність питомої витрати електроенергії конвеєра від мінімально досяжного холостого ходу і питомих енерговитрат на транспортування вантажу:

$$\begin{aligned} w_{yd} &= \frac{F_{полн}}{F_{зр}} \cdot w_{зр\_yd} = \frac{F_{полн}}{F_{зр} + F_{xx} - F_{xx}} \cdot w_{зр\_yd} = \frac{F_{полн}}{F_{полн} - F_{xx}} \cdot w_{зр\_yd} = \\ &= \frac{F_{полн} / F_{полн}}{F_{полн} / F_{полн} - F_{xx} / F_{полн}} \cdot w_{зр\_yd} = \frac{1}{1 - E_{конв}} \cdot w_{зр\_yd}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

де  $E_{конв}$  – величина, що характеризує мінімально досяжний холостий хід для певного типу конвеєра і враховує масу рухомих частин конвеєра. Наприклад,  $E_{конв} = 39\%$  для конвеєра 1ЛТП1000КСП, що визначається масами  $q_l = 15$  кг/м,  $q_p' = 20$  кг/м,  $q_p'' = 9,2$  кг/м та погонною прийнятною здатністю  $q = 94,4$  кг/м. Таке припущення правомірне при куті  $\beta = 0$ , оскільки в цьому разі величина  $E_{конв}$  не залежить від опорів руху  $c'$  та  $\omega$ . Величина  $w_{зр\_yd}$  характеризує параметри встановлення конвеєра і залежить від  $\beta$ ,  $c'$ ,  $\omega$ .

Окрема залежність  $w_{yd}$  (при величині  $w_{зр\_yd} = 0,28$  кВт·год/т·км, яка визначена відповідно до виразу (2.8), вважаючи  $\beta = 0$ ,  $c' = 1,1$ ,  $\omega = 0,08$ ,  $\eta = 0,85$ ,  $g = 9,81$  м/с<sup>2</sup>) від мінімально досяжного холостого ходу конвеєра, розрахована з урахуванням виразу (2.9), наведена на рис 2.1.

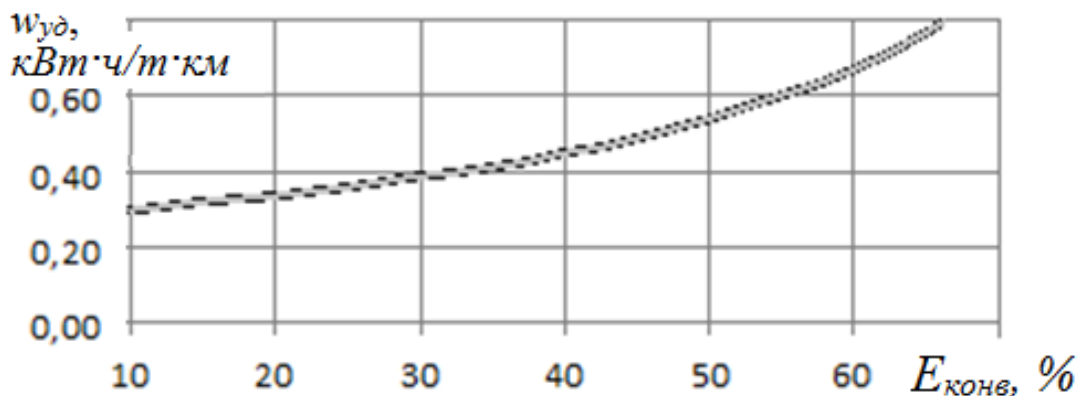


Рис. 2.1. Крива залежності питомої витрати електроенергії від мінімально досяжного холостого ходу конвеєра при  $\beta = 0^\circ$ ,  $c' = 1,1$ ,  $\omega = 0,08$

Для встановлення узагальнюючої залежності питомого електроспоживання від мінімально досяжного холостого ходу необхідно ввести поправковий коефіцієнт, що враховує зменшення величини холостого ходу конвеєра при збільшенні кута встановлення:

$$K_{\beta} = \frac{2 \cdot c' \cdot \omega}{2 \cdot c' \cdot \omega + \sin \beta}. \quad (2.10)$$

Тоді узагальнена залежність питомої витрати електроенергії конвеєрів від мінімально досяжного холостого ходу прийматиме вигляд

$$w_{y\partial} = \frac{1}{1 - E_{\text{конв}} \cdot K_{\beta}} \cdot w_{\text{сп-}y\partial}. \quad (2.11)$$

Залежність (2.11) з точністю  $\pm 10\%$  правомірна при зміні таких величин у діапазонах:  $\beta \in [0; 18^\circ]$ ,  $c' \in [1; 1,6]$ ,  $\omega \in [0,02; 0,08]$ ,  $E_{\text{конв}} \in [0,1; 0,6]$ . На рис. 2.2 і 2.3 розглянуті залежності питомого споживання електроенергії конвеєром від мінімально досяжного холостого ходу, яка визначені згідно з виразом (2.11) при різних параметрах встановлення конвеєра:

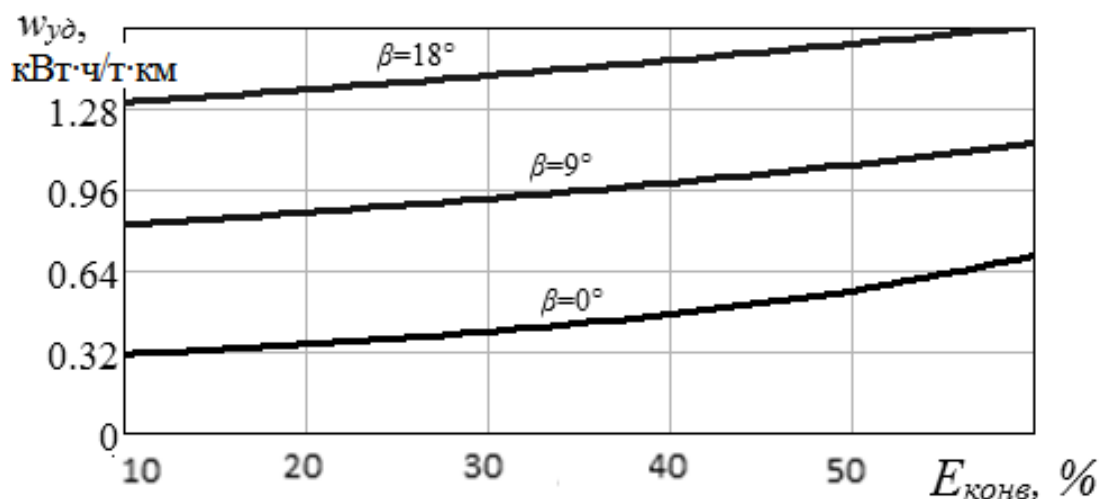


Рис. 2.2. Криві залежності питомої витрати електроенергії від мінімально досяжного холостого ходу конвеєра при  $\beta=0, 9, 18^\circ$ ;  $c'=1,1$ ;  $\omega=0,08$

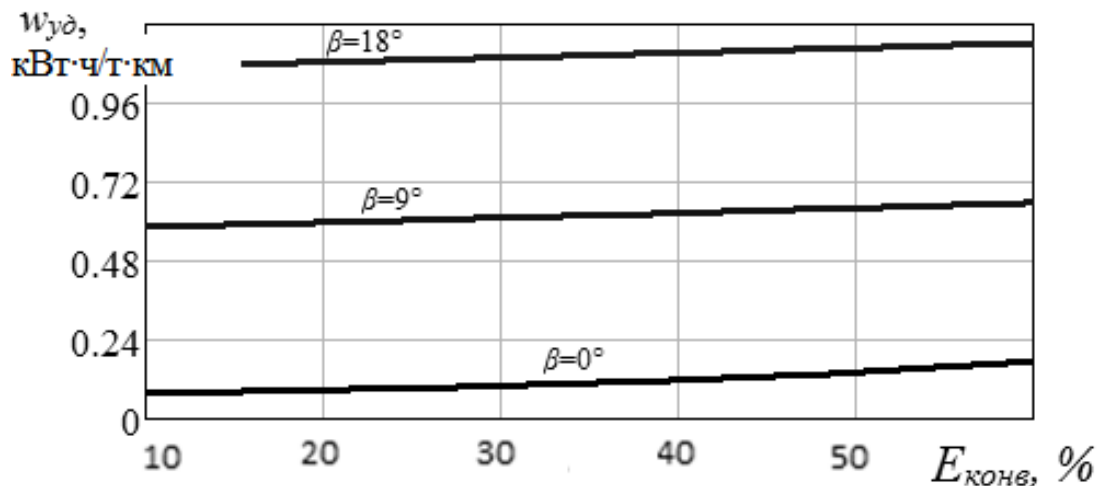


Рис. 2.3. Криві залежності питомої витрати електроенергії від мінімально досяжного холостого ходу конвеєра при  $\beta=0, 9, 18^\circ$ ;  $c'=1,1$ ;  $\omega=0,02$ .

Залежності, наведені на рис. 2.1 – 2.3, використовуються для визначення резерву можливого зниження електроспоживання стрічкових конвеєрів будь-якого типу, розрахувавши для нього величину  $E_{конв}$ . Для конкретних умов експлуатації конвеєра згідно з виразом (2.11) можливо визначити мінімальну питому витрату електроенергії. Наприклад, наведений в табл. 2.1 конвеєр типу 2ЛУ120 при горизонтальному встановленні і сильній запиленості середовища ( $\omega=0,08$ ) має значення мінімально досяжного холостого ходу конвеєра  $E_{конв}=36 \%$ . За кривою на рис 2.1 для цього конвеєра мінімальне питоме електроспоживання складе  $0,42 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{т}\cdot\text{км}$ .

Із аналізу кривих, наведених на рис. 2.1 – 2.3, також впливає, що нормовані межі питомої витрати електроенергії для стрічкових конвеєрів, згідно з роботою [62] спостерігаються при мінімально досяжному холостому ході конвеєра від 30 до 56 %, що відповідає всім типам стрічкових шахтних конвеєрів з кутом встановлення рівним  $\beta = 0$ , однак при збільшенні кута встановлення до значень  $\beta > 9^\circ$ , нормативних значень питомого електроспоживання неможливо досягти навіть при низькій запиленості середовища ( $\omega=0,02$ ).

Також аналіз кривих на рис. 2.2 дозволяє стверджувати, що на витрату електроенергії конвеєра при сильній запиленості середовища ( $\omega=0,08$ ) вагомий вплив надає мінімально досяжне значення холостого ходу: зміна  $E_{конв}$  з 30 до 55 % спричиняє таке ж збільшення питомої витрати електроенергії, як і зміна кута встановлення  $\beta$  від  $0$  до  $5^\circ$ .

Отримана оцінка електроспоживання правомірна на конвеєрах довжиною понад 200 м – коефіцієнт  $c'$ , враховує зосереджені опори на коротких конвеєрах, приймає значення понад 1,6. За допомогою залежності (2.11) неможливо також оцінити мінімально досяжне питоме електроспоживання бремсбергових конвеєрів, які можуть переходити в рекуперативний режим роботи, що більш детально буде розглянуто в п. 2.3.

При використанні технічних засобів зниження витрат електроенергії слід розглянути процес порівняння резервів підвищення енергоефективності двох різних конвеєрів з різними умовами встановлення. Наприклад, питома витрата електроенергії для конвеєра 2ЛУ120, що спостерігалася в ході експерименту, з  $E_{\text{конв}} = 36\%$  (табл. 2.1),  $\beta = 1$  град, склала 0,8 кВт·год/т·км, а для конвеєра 2ЛТ80КСП з  $E_{\text{конв}} = 48\%$   $\beta = 0 - 0,8$  кВт·год/т·км. За кривою на рис. 2.2 знаходимо, що мінімально можливо питома витрата електроенергії для конвеєра 2ЛТ80КСП: 0,52 кВт·год/т·км, а для конвеєра 2ЛУ120 з  $\beta = 1^\circ$  цей параметр становить 0,477 кВт·год/т·км (на рисунку пряма для  $\beta = 1^\circ$  не наведена, визначаємо розрахунковим шляхом за залежністю (2.11)). Отже, резерв підвищення енергоефективності для конвеєра 2ЛУ120 складає 0,323 кВт·год/т·км, а для 2ЛТ80КСП – 0,28 кВт·год/т·км. Така невелика різниця в 0,053 кВт·год/т·км при довжині конвеєра в 1 км і добовому вантажопотоці 5000 т складе різницю в річному електроспоживанні 95400 кВт·год.

Для виявлення резерву енергоефективності конвеєра також необхідно визначити його фактичну витрату електроенергії. Однак, існуючі методи визначення електроспоживання конвеєрних установок недостатньо адекватні і вимагають більш глибокого аналізу.

## **2.2. Аналіз методів визначення електроспоживання магістральних конвеєрних установок**

Величину електроспоживання конвеєрних установок можна визначити декількома способами:

1. Методом прямого виміру обсягів спожитої електроенергії:
  - а) конвеєрної установки;
  - б) ділянки конвеєрного транспорту в цілому.
2. Розрахунковими методами:
  - а) математична модель, запропонована в роботі [63];

б) точний тяговий розрахунок з використанням уточнених технологічних коефіцієнтів [17];

в) наближений тяговий розрахунок з використанням коефіцієнтів, отриманих шляхом обробки статистичних даних [14];

г) за допомогою регресійних моделей [12].

Проаналізуємо кожен з цих методів і визначимо їх точність.

1, а. Похибка методу визначення енергоефективності (електроспоживання) шляхом вимірювання обсягів спожитої електроенергії в точці підключення приводу конвеєра визначається величиною похибки вимірювальних трансформаторів струму та іншого вимірювального обладнання. Реалізується шляхом застосування обладнання автоматизації САУКЛ або УТАС, а також використанням мікропроцесорного блока обліку електроенергії на підстанціях типу ТВПШ.

1, б. Похибка методу визначення енергоефективності (електроспоживання) шляхом вимірювання обсягів спожитої електроенергії, якщо точки обліку знаходяться в КРУВ 6 кВ, визначається величиною похибки на увімкнення іншого допоміжного обладнання ділянки конвеєрного транспорту. Цей метод можливо реалізувати за допомогою апаратури САУПЕШ, а також БЗУ-2. За даними, отриманими на шахті "Павлоградська" ПрАТ "ДТЕК Павлоградвугілля", встановлені номінальні потужності допоміжного обладнання ділянки конвеєрного транспорту (УКТ) не перевищують 10–20 %. В експлуатаційних режимах двигун конвеєра має коефіцієнт завантаження  $<1$  і межі похибки розширюються до 30–50 %.

Ці методи є найточнішими, оскільки являють собою прямі вимірювання. Однак на даному етапі автоматизації конвеєрного транспорту на шахтах Західного Донбасу облік електроенергії конвеєрних установок здійснюється за допомогою апаратури БЗУ-2, що не відкалібрована належним чином. Тому необхідно розглянути методи непрямого визначення електроспоживання.

2, а. Визначення електроспоживання за допомогою моделі, наведеної в ДСТУ 3224-95. Згідно з додатком В.4 [63] витрата електроенергії стрічковими магістральними конвеєрами (кВт·год) за розрахунковий період визначається як

$$W_{кл} = 0,013 L_{к} \omega \left[ C_c v t_p + 0,28 Q_p \left( 1 \pm \frac{\sin \beta}{\omega} \right) \right], \quad (2.12)$$

де  $L_k$  – довжина конвеєра, м;  $\omega$  – коефіцієнт опору руху, що дорівнює 0,02–0,03 для стаціонарних конвеєрів, 0,04–0,06 – для встановлених в межах виїмкових ділянок, 0,08–0,12 – для працюючих в особливо важких умовах;  $C_c$  – маса 1 м рухомих частин конвеєра, кг/м;  $v$  – швидкість руху стрічки, м/с;  $t_p$  – час роботи конвеєра за розрахунковий період, ч;  $Q_p$  – розрахункова продуктивність (маса вантажу) конвеєра за час  $t_p$ , т;  $\beta$  – кут установлення конвеєра, град.

Точність залежить від адекватності прийнятого параметра  $\omega$ . У роботі [13] проведено аналіз адекватності фактичним умовам величини коефіцієнта опору руху скребкового конвеєра: похибка становить  $\pm 35\%$  при довірчій імовірності 0,95. Якщо провести аналогічний аналіз для коефіцієнта опору руху частин стрічкового конвеєра, то отримаємо похибку  $\pm 80\%$  при довірчій імовірності 0,95 без урахування умов роботи конвеєрних ліній, і похибку  $\pm 24\%$  при довірчій імовірності 0,95 з урахуванням умов роботи останніх. При розрахунку приймався діапазон зміни величини  $\omega = 0,02\text{--}0,08$ , та нормальний розподіл  $\omega$  в межах діапазону.

2, б. Етапи визначення величини електроспоживання за допомогою наближеного тягового розрахунку розглянуті в розділі 2.1 при використанні залежностей (2.1) – (2.5).

Похибка визначення витрати електроенергії відповідає розрахованій в попередньому методі, оскільки сила переміщення рухомих частин конвеєра і маси вугілля на ньому прямо пропорційна коефіцієнту опору руху частин конвеєра.

2, в. Визначення величини електроспоживання за допомогою уточненого тягового розрахунку. В роботі [17] наводиться залежність коефіцієнта опору руху конвеєрної стрічки від її натягу. Натяг, в свою чергу, залежить від багатьох чинників, які враховані у виразі за допомогою емпіричних коефіцієнтів і в явному вигляді:

$$\omega_z(q_c) = C_z''(q_c) + \frac{\varepsilon(q_c)}{q_c \cdot L} \cdot \ln \left( 1 + \frac{C_z'(q_c)}{C_z''(q_c)} \cdot e^{\frac{-S}{\varepsilon(q_c)}} \cdot e^{\frac{-(q_a + q_z) \cdot L \cdot \sin(\beta)}{\varepsilon(q_c)}} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-C_z'(q_c) \cdot L \cdot q_c}{\varepsilon(q_c)}} \right) \right) \quad (2.13)$$

$$\omega_n(q_c) = C_n''(q_c) + \frac{\varepsilon'(q_c)}{q_c \cdot L} \cdot \ln \left( 1 + \frac{C_n'(q_c)}{C_n''(q_c)} \cdot e^{\frac{-S}{\varepsilon'(q_c)}} \cdot e^{\frac{-(q_a) \cdot L \cdot \sin(\beta)}{\varepsilon'(q_c)}} \cdot \left( 1 - e^{\frac{-C_n'(q_c) \cdot L \cdot q_c}{\varepsilon'(q_c)}} \right) \right) \quad (2.14)$$

де  $\varepsilon, \varepsilon'$  – постійні натягу навантаженої і порожньої гілок відповідно, кг;  $q_c$  – вагове погонне навантаження, кг;  $C'_2, C''_2, C'_n, C''_n$  – константи, отримані з експериментальних графіків;  $L$  – довжина конвеєра;  $S$  – початковий натяг гілки, Н;  $\beta$  – кут установлення конвеєра, град.

Однак наведені залежності практично не застосовні в умовах експлуатації через відсутність інформації про фактичні значення таких величин, як константи та початковий натяг гілки, отримані для певних умов проведеного експерименту. Тому точність наведених моделей сумнівна в разі відхилення умов роботи обладнання від тих, що слугували базою для розробки.

## 2, г. Застосування регресійних моделей.

Згідно з чинним стандартом з енергоаудиту для гірничодобувних підприємств України [64] питома витрата електроенергії конвеєрним транспортом однозначно визначається відповідно до наведеної на рис. 2.1 залежності питомого електроспоживання від зміни вантажопотоку. Однак відповідно до положень, наведених в роботі [13], приходимо до висновку, що такий підхід є некоректним, тому що коефіцієнти моделі питомого енергоспоживання залежать від багатьох факторів, таких як кут установки конвеєра, вага рухомих частин, ККД установки та інші, котрі необхідно визначати з урахуванням реальних умов роботи обладнання. У літературному джерелі [13] наведені регресивні моделі електроспоживання з урахуванням умов роботи і типів конвеєрів: тому такий підхід є коректним. При цьому похибка прогнозування питомої витрати електроенергії за допомогою отриманих моделей для умовних середніх у всьому діапазоні (500–2500 т·км/доб) вантажопотоків з очисних вибоїв знаходиться в межах 2,9–14,7 %. У такому випадку можлива оцінка величини середнього електроспоживання за період не менший робочої зміни.

До того ж, за відсутності регресійної моделі величини електроспоживання конвеєра від вантажопотоку, визначеної за умов, ідентично необхідних, прогноз витрат електроенергії конвеєром буде некоректним. Тому існує необхідність визначати електроспоживання конвеєра за інтервал осереднення, що дорівнює періоду автокореляції вантажопотоку, розрахунковим шляхом, що враховує особливості функціонування конвеєра. Оскільки в розрахункових методах необхідна інформація про величину вантажопотоку за період його автокореляції, то існують передумови для розробки алгоритму ідентифікації хвилинних значень вантажопотоку, що прямує з очисного вибою.

### 2.3. Визначення хвилинних значень вантажопотоку, що прямує з очисного вибою

Виявлення динаміки вантажопотоку, що прямує з очисного вибою, за період його автокореляції необхідно для визначення електроспоживання шахтних конвеєрних установок розрахунковими методами. Врахування величини вантажопотоку недоцільне при визначенні електроспоживання конвеєра в реальному часі, а також при прогнозуванні середньої витрати електроенергії бремсбергових конвеєрів.

У роботах [65, 66] як вимірники вугільної маси виступають конвеєрні ваги. В роботі [67] для ідентифікації значень потоку вугілля пропонується використовувати ультразвуковий датчик. Однак ці способи вимагають додаткових технічних засобів дообладнання конвеєрних ліній, що супроводжується зниженням надійності системи визначення вантажопотоку, прямоючого з очисного вибою. Способів визначення величини вантажопотоку, що прямує з очисного вибою, без застосування додаткових технічних засобів так і не було виявлено.

В роботі [68] запропонований спосіб визначення часу функціонування очисного комбайна в режимі виймання корисної копалини непрямо за рівнем і швидкістю зростання активної потужності видобувного комплексу. Облік електричної енергії здійснюється в комірках КРУВ 6 кВ при живленні від кожної комірки однієї ПДПП. Описаний спосіб дозволяє визначити інтервали часу надходження і відсутності вантажу на скребкових конвеєрах. Однак, для визначення інтервалів часу наявності і відсутності вантажопотоку в місці вивантаження з лави і його хвилинних значень необхідно реалізувати алгоритм, наведений на рис 2.4 [69,70].



Рис. 2.4 Блок-схема алгоритму визначення хвилинних значень вантажопотоку, що прямує з очисного вибою



Блок-схема містить:

1. Визначення рівня активної потужності і швидкості її зростання (як показано в роботі [68]), що здійснюється програмним способом за попередньо отриманим графіками електричних навантажень (ГЕН) очисного комплексу. За хвилинним значенням швидкості подачі видобувного комбайна або складу і потужності електрообладнання комплексу розраховуються нижній і верхній пороги потужності при вийманні вугілля і модуль величини знакозмінної похідної. Ці дані використовуються для отримання інформації в оперативному режимі.

2. Визначення швидкості подачі комбайна здійснюється за регресійною моделлю, встановленою згідно з ГЕН очисного комплексу і вимірами відповідних значень швидкості подачі або даними про видобуток. Швидкість подачі прямо пропорційно залежить від потужності, яку споживає очисний комплекс під час виймання корисної копалини (див. рис. 2.7).

3. Місце знаходження комбайна в лаві визначається шляхом інтегрування значень швидкості подачі за час виймання і відліковується від початку лави.

4. Розраховується час переміщення вугілля до початку лави за значеннями швидкості руху скребкового конвеєра.

5. Швидкість подачі однозначно визначає обсяг видобутого вугілля: з урахуванням часу його доставки скребковим конвеєром знаходяться хвилинні значення потоку вугілля з очисного вибою.

6. Використовуючи ГЕН, визначається час, що витрачається на кінцеві операції, та початок наступного циклу.

Розглянемо дії наведеного алгоритму (рис 2.4) при використанні експериментальних даних, отриманих в умовах шахти ім. Н.І. Сташкова [68]. В очисному комплексі встановлено таке обладнання: комбайн МК-67 (встановлена потужність двигуна 115 кВт), насос місцевого зрошення НУМС (32 кВт), маслостанція (30 кВт), конвеєр СП-46 (3x22 кВт), насосна станція СНУ-4 (2 , 2 кВт), лебідка ЛГД2 (4,5 кВт), апарат пусковий АП-3,5 (3,5 кВт).

У ході експерименту встановлено, що споживана комплексом активна потужність при вийманні перевищує 81 кВт, а модуль похідної потужності – значення 60 кВт/хв під час пуску/зупинки комбайна. Графіки активної потужності та її похідної наведені на рис. 2.5 та 2.6

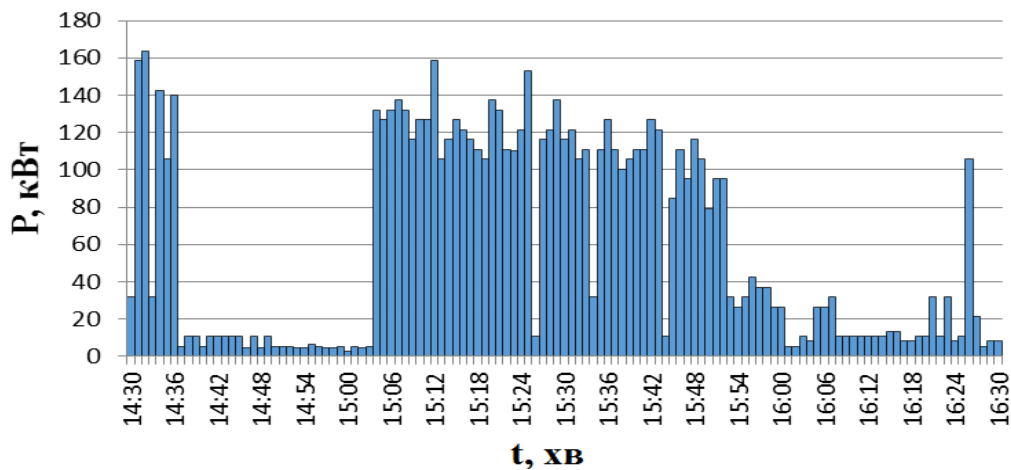


Рис. 2.5. Діаграма електричних навантажень очисного комплексу

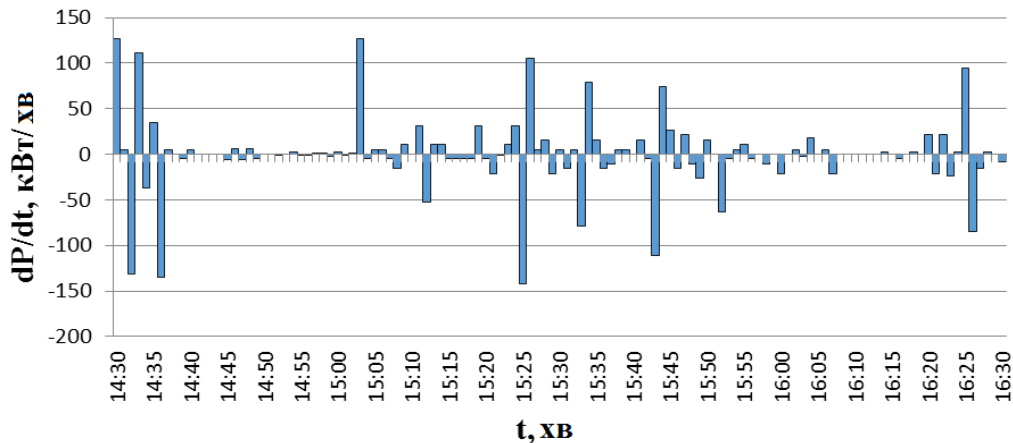


Рис. 2.6. Графік залежності похідної активної потужності очисного комплексу від часу

Для визначення місця розташування комбайна необхідно знати кореляційну залежність його швидкості подачі від потужності в періоди роботи з урахуванням граничних значень  $P$ . З теоретичних міркувань [71] залежність записуємо як лінійний поліном такого вигляду:

$$v(P) = a_1 + a_2 \cdot P, \quad (2.15)$$

де  $v(P)$  – швидкість подачі комбайна, м/с;  $P$  – потужність, яка споживається видобувним комплексом, кВт;  $a_1, a_2$  – коефіцієнти моделі.

Для вибраної моделі апроксимацію емпіричних даних (рис. 2.5) будемо здійснювати за допомогою методу найменших квадратів (МНК). Попередньо визначимо кореляційне відношення, яке є мірою залежності (тісноти зв'язку) між шуканими величинами і записується так:

$$\eta_{v/P} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\tilde{v}_{P_i} - \bar{v})^2}{\sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2}}, \quad (2.16)$$

де  $\tilde{v}_{P_i}$  – швидкість подачі очисного комбайна, що визначається за рівнянням регресії  $\tilde{v} = f(P)$  для  $i$ -го значення споживаної потужності;  $\bar{v}$  – середнє вибіркве значення швидкості подачі очисного комбайна;  $v_i$  –  $i$ -е значення швидкості подачі очисного комбайна в розглянутій вибірці.

Для нашого випадку кореляційне відношення  $\eta_{v/P} = 0,68$ .

Отримані дані вказують, що в умовах експлуатації зв'язок між швидкістю подачі вугільних комбайнів і споживаною потужністю – суттєвий.

Черговість визначення параметрів теоретичної лінії регресії розглянемо на прикладі згладжування експериментальних даних за допомогою лінійної моделі. Коефіцієнти  $a_1$ ,  $a_2$  знайдемо згідно з методом найменших квадратів (МНК) за експериментальними даними, отриманими для нормального процесу роботи вуглевидобувних комплексів [13].

$$\tilde{a}_1 = \bar{v} - \tilde{a}_2 \bar{P}; \quad (2.17)$$

$$\tilde{a}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})(v_i - \bar{v})}{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}. \quad (2.18)$$

де  $\bar{P}$  – математичне очікування потужності;  $P_i$  –  $i$ -те значення потужності;  $\bar{v}$  – математичне сподівання швидкості подачі комбайна;  $v_i$  –  $i$ -е значення швидкості подачі комбайна.

Для розглянутого випадку лінійна регресія має такий вигляд:  $v(P) = 0,376 + 0,011 \cdot P$  (рис. 2.7)

Величина відхилення емпіричної регресії  $\tilde{v} = \tilde{a}_1 + \tilde{a}_2 P$  від істинної  $v = a_1 + a_2 P$  може бути оцінена для будь-якого заданого значення  $P = P_x$  за допомогою виразу

$$\tilde{v} \pm \frac{t_{q,n-2}s}{\sqrt{n-2}} \sqrt{1 + \frac{n^2(P_x - \bar{P})^2}{n \sum_{i=1}^n P_i - (\sum_{i=1}^n P_i)^2}}, \quad (2.20)$$

де  $s = \sqrt{\sum_{i=1}^n d_i^2 / n}$  – залишкова дисперсія;  $d_i = v_i - \tilde{a}_1 - \tilde{a}_2 P$  – відхилення дійсної швидкості подачі комбайна від обчисленої за рівнянням регресії  $\tilde{v} = \tilde{a}_1 + \tilde{a}_2 P$ ;  $t_{q,n-2}$  –  $t$ -критерій для 95%-го довірчого інтервалу;  $P_x$  – значення потужності, для якого будується довірчий інтервал.

Результати побудови довірчих інтервалів для залежності швидкості подачі комбайна від витрат електроенергії комплексу з вибірок, що досліджувалися, при граничних величинах потужності, яка спостерігалася в експерименті, наведені в табл. 2.2, а також розглянуто на рис. 2.7.

Таблиця 2.2

Оцінка точності регресійної моделі

Нижнє і верхнє граничні значення $P$ , м/хв	Розраховані значення $\tilde{v}$ , кВт·год/т	95% -ві довірчі межі для умовного середнього $M(v/P)$ , (м/с)/%		95% -ві довірчі межі для індивідуальних значень $v_i$ , (м/с)/%	
		Нижня	Верхня	Нижня	Верхня
84,48	1,22	$\frac{1,15}{-8}$	$\frac{1,46}{8}$	$\frac{0,9}{-34}$	$\frac{1,87}{34}$
163,68	2,55	$\frac{1,99}{-12}$	$\frac{2,37}{12}$	$\frac{1,84}{-21}$	$\frac{2,81}{21}$

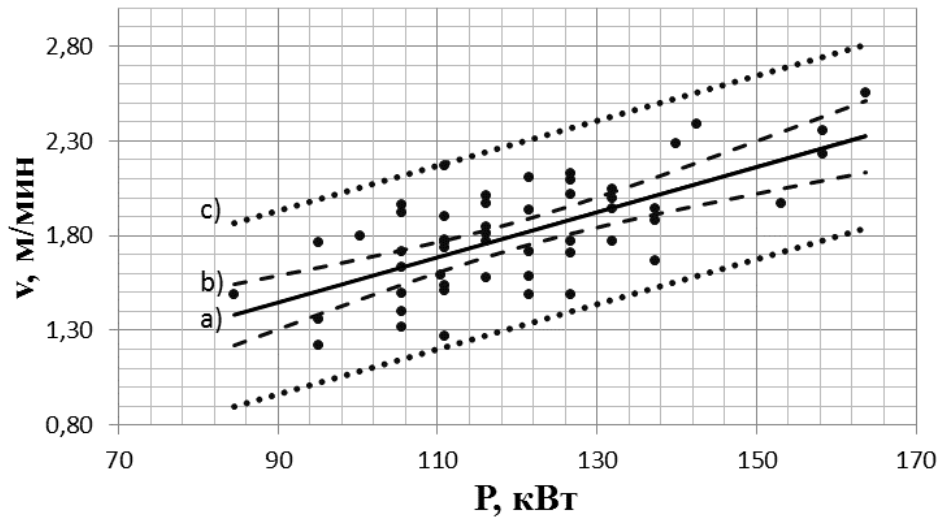


Рис. 2.7. Лінія регресії (a), а також 95% -ві довірчі інтервали для середніх (b) і індивідуальних (c) значень швидкості подачі очисного комбайна

Аналіз виразу (2.20) і рис. 2.7 свідчить, що довірчі інтервали для умовного середнього  $M(v/P_x)$  залежать від того, для якого значення  $v_x$  вони будуються. Ці межі найбільш близькі одна до одної при  $P_x = \bar{P}$ . Точність швидкості подачі комбайна, з використанням регресійних моделей знижується в міру віддалення величини  $P_x$  від середнього значення  $\bar{P}$ . Для крайніх значень  $P$ , які спостерігалися в процесі промислового експерименту, точність визначення умовних середніх  $M(v/P)$  при прийнятій довірчій імовірності  $p = 0,95$ , як це впливає з розрахунків, лежить в межах  $\pm 8... \pm 12$  %. Для середніх значень цей показник зменшується до  $\pm 4$  %.

За відсутності експериментальних даних щодо швидкості подачі комбайна і відомому позмінному обсязі видобутку вугілля пропонується використовувати такий спосіб. Обсяг видобутого вугілля однозначно визначається залежністю

$$Q_i = \gamma t \beta v_i, \quad (2.21)$$

де  $t$  – виймаєма потужність пласта, м;  $\beta$  – ширина захвату виконавчого органа, м;  $\gamma$  – щільність вугілля в масі, т/м<sup>3</sup>;  $v_i$  – швидкість подачі комбайна, м/хв.

Залежність змінного обсягу видобутку вугілля від енергоспоживання запишемо у вигляді

$$Q_{cm} = \sum(\gamma m \beta v_i) = \sum[(\gamma m \beta)(a_1 + a_2 \cdot P_i)]. \quad (2.22)$$

За достатнім для достовірного результату кількості значень  $Q_{cm}$  визначають коефіцієнти моделі  $a_1, a_2$ .

Місцезнаходження комбайна в лаві встановлюють шляхом інтегрування значень швидкості подачі за час роботи  $t_k = t_2 - t_1$ , тобто

$$L_k = \int_{t_1}^{t_2} v_i dt, \quad (2.23)$$

де  $v_i$  – хвилинні значення швидкості подачі видобувного комбайна за час його роботи, обчислені за рівнянням регресії.

Для представлених на рис. 2.5 даних за час роботи з 15:03 до 15:51 комбайн перемістився на 75,3 м  $\pm 5,6$  % з довірчою ймовірністю 95 %. Природно, при збільшенні пройденого комбайном шляху абсолютна помилка визначення його місця розташування зростає, але при досягненні комбайном кінця лави помилка обнуляється, а максимальне її значення при довжині очисного вибою 220 м складе  $\pm 26,4$  м з довірчою ймовірністю 95 %.

При швидкості скребкового конвеєра 1 м/с це спричинить за собою помилку в часі затримки доставки вугілля на підлавний конвеєр до 26,4 хв в кінцевому положенні комбайна. Час доставки вугілля до підлавної конвеєра визначається як

$$t_{doc} = L_k / v_{скр}, \quad (2.24)$$

де  $v_{скр}$  – постійна швидкість руху скребкового конвеєра.

Для прийнятих умов, визначаючи за регресійною залежністю хвилинні значення швидкості подачі комбайна і з огляду на час затримки доставки вугільної маси скребковим конвеєром, розрахуємо величину хвилинних значень потоку вугілля з очисного вибою:

$$Q_i = \gamma m \beta v_{i-t_{doc}} (P_{i-t_{doc}}). \quad (2.25)$$

З огляду на довірчі інтервали визначення швидкості подачі, розраховуємо величину хвилинних значень потоку вугілля з очисного

вибою. Помилка при ідентифікації часу транспортування вантажу до конвеєра при визначенні маси хвилинного значення вантажу незначна.

Кінцеві операції, під час яких не здійснюється виймання корисної копалини, також визначаються за рівнями потужності та її першої похідної. Водночас обнуляється значення часу доставки вугільної маси до підлавної конвеєра, і розрахунок повторюється.

Після визначення хвилинних значень потоку вугілля з очисного вибою, використовуючи спрощений тяговий розрахунок конвеєра [14], знаходимо хвилинні значення електроспоживання стрічкових магістральних конвеєрів. Таким чином, значення електроспоживання розраховується за інтервал часу, близький до хвилини.

#### **2.4. Закономірності розподілу можливих значень електроспоживання**

Метод визначення фактичних хвилинних значень вугільного потоку, розроблений і наведений в п. 2.3, дозволяє встановити ймовірні значення витрати електроенергії конвеєрами, які приймають вугілля з одного очисного вибою. Однак при злитті декількох потоків необхідно знати закони розподілу вугілля у вузлах конвеєрної мережі.

Вугілля надходить потоком на транспортну конвеєрну мережу з очисних вибоїв. Такий потік має випадкові періоди наявності і відсутності вантажу і ряд миттєвих (або хвилинних) значень за час його надходження. Конвеєри, не оснащені регульованим приводом, створюють постійне транспортне запізнювання потоку до вузлів транспортної мережі. З урахуванням зазначених факторів у вузлах схеми формуються хвилинні значення вантажопотоку.

Для визначення енергоефективності конвеєрів з лінійною залежністю електроспоживання від вантажопотоку встановимо найбільш адекватний закон розподілу хвилинних значень вантажопотоків при підсумовуванні декількох у вузлах транспортної мережі.

Для визначення законів розподілу хвилинних значень вантажопотоку використовуємо метод найбільшої правдоподібності [72]. При відомих хвилинних значеннях вантажопотоку в вузлах транспортної конвеєрної мережі переходимо до визначення законів розподілу цих величин. На рис. 2.8 представлені криві хвилинних значень вантажопотоків і подальша їх апроксимація різними ймовірнісними законами. Хвилинні значення вантажопотоків отримані шляхом імітаційного моделювання за результатами виконаного дослідження [12].

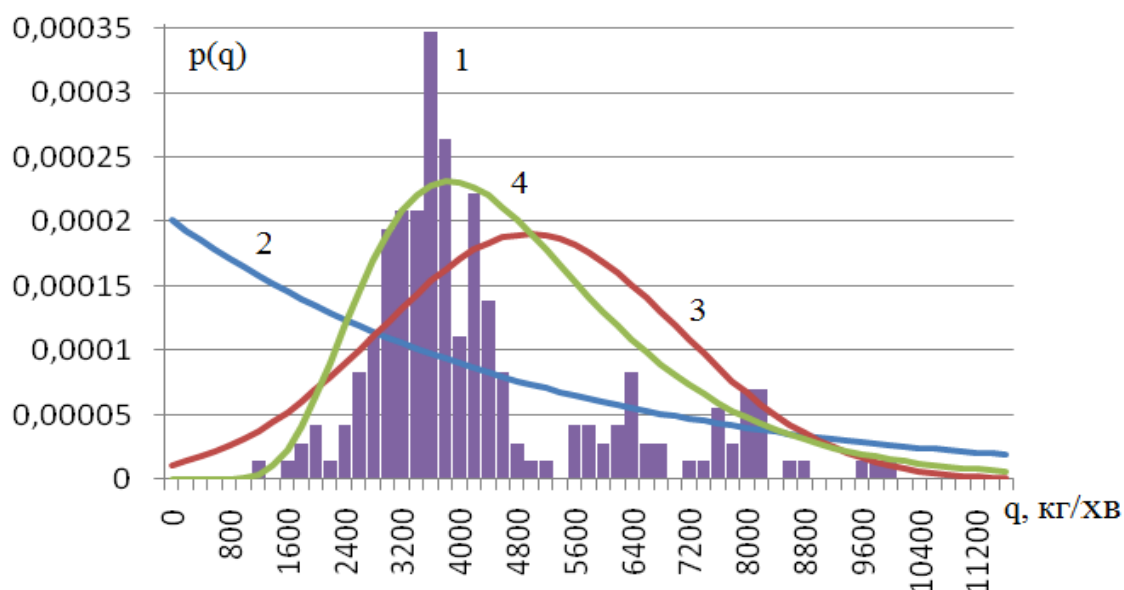


Рис. 2.8. Криві хвилинних значень сумарного вантажопотоку трьох очисних вибоїв, апроксимованими різними ймовірнісними законами: 1 – експериментальні значення; 2 – експонентний закон розподілу; 3 – нормальний закон розподілу; 4 – нормальний логарифмічний закон розподілу

Для вихідної вибірки (рис 2.8) застосуємо метод найбільшої правдоподібності: зупиняємося на трьох видах стандартних розподілів, а саме: експоненційному, нормальному і нормальному логарифмічному. Знаходимо точкові оцінки цих розподілів – перший і другий моменти згідно з роботою [72].

Функції правдоподібності для вибраних видів розподілу: експоненційного

$$L(\lambda) = \prod_{i=1}^n p(\xi_i, \lambda) = \lambda^n \prod_{i=1}^n e^{-\lambda \xi_i}; \quad (2.26)$$

нормального

$$L(a, \sigma) = \prod_{i=1}^n p(\xi_i, a, \sigma) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(\xi_i - a)^2}{\sigma^2} \right); \quad (2.27)$$

логнормального



$$L(a, \sigma) = \prod_{i=1}^n p(\xi_i, a, \sigma) = \frac{1}{\sigma^{\xi_i} \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \frac{(\ln \xi_i - a)^2}{\sigma^2}\right); \quad (2.28)$$

Логарифмуючи функції (2.26) – (2.28) запишемо так:

$$\ln L(\lambda) = n \ln \lambda - \lambda \sum_{i=1}^n \xi_i; \quad (2.29)$$

$$\ln L(a, \sigma) = \prod_{i=1}^n p(\xi_i, a, \sigma) = -n \ln \sigma - n \ln \sqrt{2\pi} - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\xi_i - a)^2; \quad (2.30)$$

$$\ln L(a, \sigma) = \prod_{i=1}^n p(\xi_i, a, \sigma) = -n \ln \sigma - n \ln \xi_i - n \ln \sqrt{2\pi} - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{i=1}^n (\ln \xi_i - a)^2. \quad (2.31)$$

Визначивши умови екстремуму по першій похідній параметра  $\lambda$  для першого розподілу та  $a, \sigma$  – для інших, отримаємо оціночні вибіркові середні та вибірккову дисперсію.

Використовуючи критерій узгодженості Пірсона, оцінюємо можливість апроксимації експериментальних даних наведеними вище видами розподілів.

Статистика критерію Пірсона:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(n_j - np_j)^2}{np_j}, \quad (2.32)$$

де  $np_j$  – очікувана кількість влучень до  $j$ -го інтервалу;  $n_j$  – спостережувані величини. Результати розрахунків зведемо до табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Оціночні величини розподілів  
методу найбільшої правдоподібності

Розподіл	Вибіркове середнє	Вибіркова дисперсія	Критерій Пірсона $\chi^2$
Експоненційний	4971,73	4971,73	0,0008
Нормальний	4971,73	2094,77	0,3069
Логнормальний	4568,16	1614,12	0,8889

У результаті підрахунку критерію згоди Пірсона отримуємо ймовірності відповідності розподілів, які наведені у табл. 2.4. Відтак, при надходженні вугілля з декількох очисних вибоїв найбільш точно хвилинні значення вугільних вантажопотоків описує нормально логарифмічний розподіл.

За встановленим законом розподілу вугільного потоку у вузлах конвеєрної мережі визначають електроспоживання конвеєрів за зміну або більш тривалий період, використовуючи точкові оцінки розподілу та приймаючи допущення про лінійну залежність витрати електроенергії від маси вантажу на конвеєрі:

$$F(QS) = (a \cdot QS + b) / \eta_{\text{мех}}, \quad (2.33)$$

де  $a$ ,  $b$  – коефіцієнти, що враховують питому масу стрічки, роликів, зчеплення між стрічкою та барабаном, опір руху стрічки;  $QS$  – маса вантажу на конвеєрі, кг. Відповідно до виразу (2.1) коефіцієнти  $a$  та  $b$  визначаються так:

$$a = g \cdot (c' \cdot \omega \cdot \cos \beta + \sin \beta); \quad (2.34)$$

$$b = 2 \cdot l \cdot g \cdot q_n \cdot c' \cdot \omega \cdot \cos \beta + l \cdot g \cdot \omega \cdot (q'_p + q''_p). \quad (2.35)$$

З огляду на це маса вантажу на конвеєрі

$$QS = M[Q(t)] \cdot l, \quad (2.36)$$

де  $Q(t)$  – вантажопотік, кг/хв;

Витрата електроенергії при  $v_k = \text{const}$  за зміну або добу

$$W = F(M[Q(t)] \cdot l) \cdot v_k \cdot t, \quad (2.37)$$

де  $v_k$  – швидкість руху конвеєра, м/с.

Відзначимо, що використовувати оціночні характеристики розподілу вугільного потоку для визначення витрати електроенергії можливо тільки при лінійній залежності енергоспоживання від навантаження, яка є справедливою для горизонтальних та конвеєрів, що працюють на ухил.

У п. 2.1 (залежність (2.11), рис. 2.2 – 2.3) розроблена модель визначення мінімально можливої питомої витрати електроенергії для конвеєра з конкретними умовами встановлення. Але для бремсбергових конвеєрів, привід яких за наявності певної маси вантажу переходить у генераторний режим роботи, поняття мінімально прийнятного електроспоживання відсутнє, оскільки здійснюється рекуперація.

Діапазон величини електроспоживання конкретного конвеєра визначається зміною опору руху стрічки [17], переходом приводу у рекуперативний режим при негативних кутах [14] чи одночасно тим, та іншим. У роботах [73, 14, 61] наводяться різні граничні кути встановлення конвеєра, менше яких можливий рекуперативний режим роботи: від  $-3$  до  $-6^\circ$ .

Все це призводить до необхідності визначення законів розподілу маси вантажу на бремсберговом у конвеєрі, які залежать від статистичних характеристик вантажопотоків з очисних вибоїв.

Згідно з літературними джерелами [18,19] вугільний потік з очисного вибою описується як стаціонарний марковський процес з часом кореляції, що дорівнює хвилині. Приймаємо, що протягом хвилини потік не змінюється. Відповідно до проведених досліджень [12] у період надходження вугілля потік розподілений нормально з математичним сподіванням  $M_q$  (кг/мин). Випадкові періоди наявності та відсутності вугільної маси на стрічці описуються пуассоновим розподілом з математичними сподіваннями  $T_n$  і  $T_o$ .

Введемо параметр  $n$  (2.38), за допомогою якого можна охарактеризувати ймовірність міри заповнення конвеєра вантажем залежно від значень інтервалів  $T_n$  и  $T_o$ , довжини конвеєра  $L$  та швидкості стрічки  $v$ . Чим більше добуток  $(T_n + T_o) \cdot v$ , тим більша ймовірність роботи конвеєра у «крайніх» станах: чи повністю порожнім, чи повністю завантаженим. І навпаки, чим менше добуток  $(T_n + T_o) \cdot v$ , тим більша ймовірність роботи конвеєра із середнім (або близьким до середнього) завантаженням при одному й тому ж значенні  $L$ .

$$n = L / (T_n + T_o) \cdot 60v. \quad (2.38)$$

Для подальшого вирішення приймемо спрощення, округливши  $n$  до цілого числа. Заповнення конвеєра поділяємо на  $n$  частин. Тоді для конвеєра з довжиною  $L$  і швидкістю руху стрічки  $v$ , який приймає вантаж

з однієї лави, ймовірність його заповнення на величину  $x/n$  буде визначатися згідно з біномним розподілом Ньютона (2.39), де  $x$  – ціле число,  $x \in n$ . Відношення  $x/n$  характеризує повноту завантаження конвеєра. При  $x/n=1$  конвеєр завантажений рівномірно за всією довжиною на 100 % вантажопотоком з параметрами, чисельно дорівнюють математичному сподіванню потоку вугілля, яке надходить на конвеєр. При  $x/n=0,5$  конвеєр завантажений на 50 %, при  $x/n=0,2$  – на 20 %.

$$p_n(x) = \frac{n!}{x!(n-x)!} \cdot \left( \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \right)^x \left( \frac{\mu}{\lambda + \mu} \right)^{n-x}, \quad (2.39)$$

де  $\lambda \cdot \Delta t$  – імовірність переходу від 1 до 0;  $\mu \cdot \Delta t$  – імовірність переходу від 0 до 1;  $\Delta t$  – інтервал часу, що розглядається;  $\lambda = 1/T_n, \mu = 1/T_0$ , де  $T_n$  і  $T_0$  – математичні сподівання часу надходження і відсутності вантажопотоку.

Логічно припустити, якщо вантаж транспортується конвеєром за час, близький до хвилини або менший, то при допущенні про хвилинну кореляцію вантажопотоку [16,18] робота конвеєра можлива лише у двох дискретних станах: завантаженому на величину хвилинного математичного сподівання вантажопотоку при його наявності та повністю порожнім при його відсутності. Імовірність перебування конвеєра у таких станах відповідно визначається ймовірністю наявності та відсутності вантажопотоку за інтервал часу, який дорівнює хвилині.

Як бачимо з рис. 2.9 щільність імовірності часткового завантаження конвеєра залежить від його конструктивних параметрів і середнього часу наявності/відсутності вантажопотоку, розрахованого за формулами (2.38) і (2.39). Наведені два випадки: а)  $n=2$ , б)  $n=10$ , що демонструють як параметр  $n$  впливає на ймовірність заповнення конвеєра до певного рівня. Наприклад,  $n=2$ : довжина конвеєра  $L=600$  м, швидкість руху стрічки – 1 м/с, математичні очікування періодів надходження і відсутності вантажу відповідно  $T_n=4$  хв і  $T_0=6$  хв;  $n=10$ : випадок довгого конвеєра 1500 м, швидкість руху стрічки – 0,5 м/с, математичне сподівання періодів надходження і відсутності вантажу відповідно  $T_n=2$  хв і  $T_0=3$  хв. За математичними сподіваннями інтервалів відсутності та наявності вантажопотоку легко підрахувати, що коефіцієнт машинного часу роботи очисного вибою для обох випадків становить  $K_M=40$  %

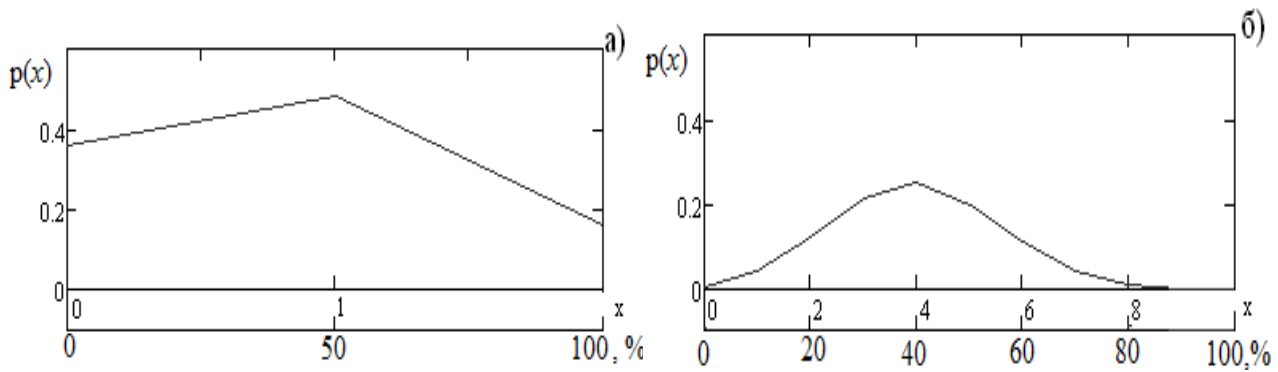


Рис. 2.9. Графік щільності ймовірності часткового завантаження конвеєра при  $n = 2$  (а) та 10 (б)

Аналізуючи рис. 2.9, можемо зробити висновок, що чим більше  $n$ , тим ближче математичне сподівання завантаження конвеєра по масі до значення коефіцієнта машинного часу очисного вибою, з якого надходить вугілля, а при малих  $n$  ( $n=1,2$ ) більш вірогідні режими роботи або вхолосту, або близькі до повного заповнення конвеєра.

Параметр  $n$  впливає на витрату електроенергії для бремсбергових конвеєрів з кутами встановлення, меншими  $-6^\circ$ , привід яких може переходити в генераторний режим роботи. Для бремсбергового конвеєра

$$F = \begin{cases} a(QS + b) / \eta_{\text{мех}} & \text{при } a(QS + b) \geq 0; \\ a(QS + b) \cdot \eta_{\text{мех}} & \text{при } a(QS + b) < 0. \end{cases} \quad (2.40)$$

Тоді при  $v_k = \text{const}$  величина електроспоживання конвеєра за добу або зміну визначається як

$$W = F(QS(Q(t_i), Q(t_{i+1}), Q(t_{i+n}))) \cdot v_k \cdot t, \quad (2.41)$$

де  $Q(t_i), Q(t_{i+1}), Q(t_{i+n})$  – значення процесу  $Q(t)$ , які визначають масу вантажу на конвеєрі,  $QS = \sum_{x=i}^{i+n} Q(t_x)$ .

Наприклад, для конвеєра типу 1л100к з параметрами:  $q''_p = 9,2$  кг/м;  $q'_p = 20$  кг/м;  $q_l = 15$  кг/м;  $\omega = 0,06$ ;  $c' = 1,1$ ;  $L = 1000$  м;  $\beta = -6^\circ$ ;  $v = 2$  м/с залежність електроспоживання від маси вугілля на ньому має вигляд як на рис 2.10.

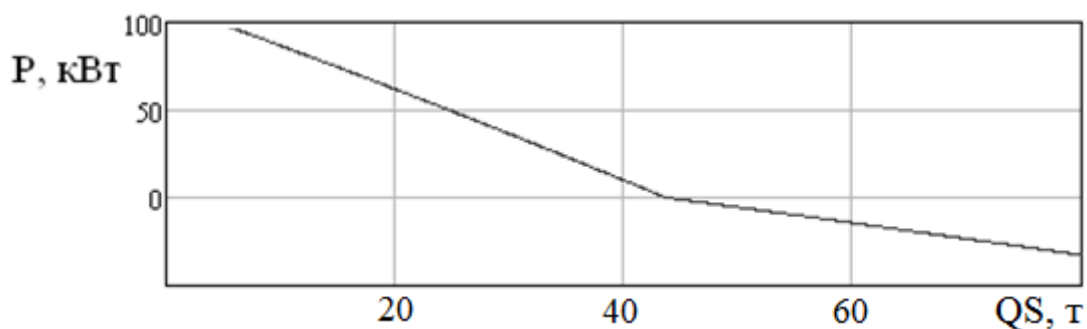


Рис. 2.10. Графік залежності величини електроспоживання бремсбергового конвеєра довжиною 1 км і з кутом встановлення  $-6^\circ$  від маси вугля на ньому

Визначимо витрату електроенергії при одному і тому ж обсязі переміщеного вугілля (прийнемо  $Q = 800$  т/зміну), але різних  $n$  ( $n=1,2,3,5,6$ ) коли тривалість зміни 6 годин. Результати розрахунку зведемо до табл. 2.5.

Таблиця 2.5

Витрата електроенергії бремсберговим конвеєром за зміну залежно від  $n$

Параметр $n$	1	2	3	4	5	6
Витрата енергії конвеєром $W$ , кВт·год	319,2	246,6	234,6	218	213,7	210,6

Оскільки вигляд кривої на рис. 2.10 зберігається для всіх конвеєрів з кутами встановлення менше  $-6^\circ$ , то можна стверджувати, що при збільшенні  $n$  енергоефективність конвеєра зростає. Також можна стверджувати, що величина випадкового змінного (або добового) електроспоживання бремсбергового конвеєра може змінюватися в широких межах (для наведеного випадку від 210 до 319 кВт·год/зміну) при одному і тому ж обсязі перевезеної гірської маси. Це пояснюється дисперсією величини фактичних інтервалів надходження і відсутності гірської маси за певну зміну від значень їх математичного сподівання.

Можливі значення математичного сподівання питомої витрати електроенергії бремсбергового конвеєра при певному добовому вантажопотоці розраховуються за залежностями (2.6), (2.36). На рис. 2.11 наведена залежність математичного сподівання питомої витрати електроенергії від добового вантажопотоку для конвеєра 1л100к з такими параметрами:  $q''_p=9,2$  кг/м;  $q'_p=20$  кг/м;  $q_{\text{л}}=15$  кг/м;  $c'=1,1$ ;  $L=640$  м;  $\beta = -6^\circ$ ;  $v=2$  м/с. У тій самій координатній

площині наведені гранично можливі (в меншу і більшу сторони) розрахункові значення питомого електроспоживання. Великий діапазон між кривими найбільшого і найменшого електроспоживання конвеєра при одному і тому ж змінному вантажопотоці спостерігається внаслідок переходу приводу конвеєра в рекуперативний режим при певній масі вантажу на ньому і зниженому ККД процесу рекуперації, що обумовлено додатковими силами тертя.

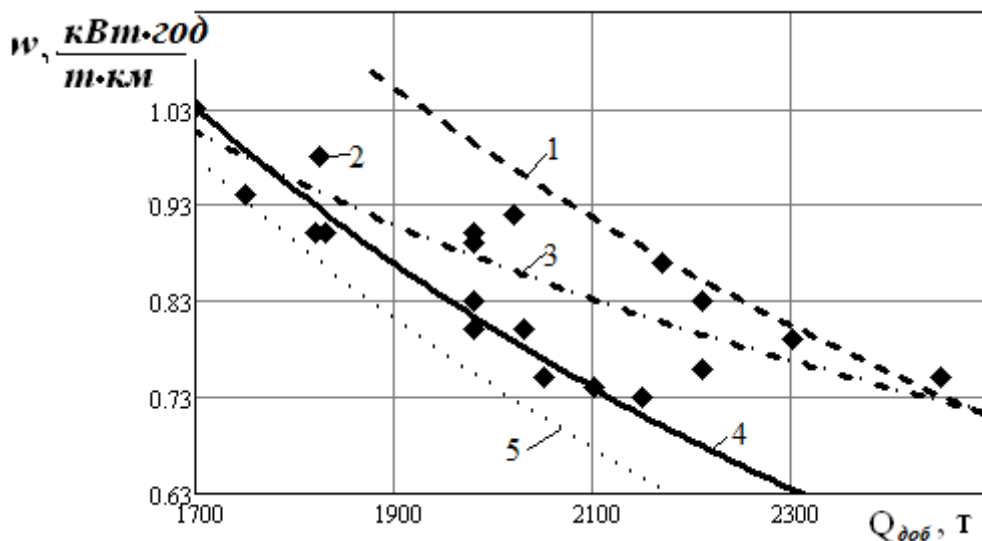


Рис. 2.11. Аналітично-статистична модель залежності питомого електроспоживання конвеєра типу 1л100к від добового вантажопотоку, де 1 – максимально можливе електроспоживання; 2 – експериментальні точки; 3 – регресійна залежність  $w_{\text{рег}}(Q)=0,093+1551,9/Q$ , побудована за експериментальними даними [13]; 4 – математичне сподівання добового електроспоживання; 5 – мінімально можливе електроспоживання.

При кількості вантажопотоків більше одного ймовірісне навантаження на конвеєр визначається з урахуванням імовірності відповідних сумарних станів від кожного вантажопотоку за відомими законам теорії ймовірності [72].

Наприклад, якщо на конвеєрі зустрічаються 2 вантажопотоки, то кожен із них з  $n=3$  (при цьому для результуючого потоку  $n$  збільшується до 5) і математичними сподіваннями інтервалів відсутності і наявності вантажу  $T_n = 4$  хв і  $T_0 = 6$  хв, то ймовірності завантаження конвеєра на певний відсоток наступні, див. табл. 2.6.

Таблиця 2.6

## Імовірність завантаження конвеєра на певний рівень

x (% загрузки)	1(0%)	2 (25%)	3 (50 %)	4 (75 %)	5 (100%)
P, відн. од.	0,128	0,346	0,346	0,154	0,026

Значення, наведені в табл. 2.6, свідчать про те, що при збільшенні кількості вантажопотоків імовірність появи максимального завантаження конвеєра знижується.

З рис. 2.11 випливає, що витрата електроенергії залежить від розподілу хвилинних значень вантажопотоків у часі: мінімальне можливе електроспоживання (крива 5) спостерігається при повністю вирівняному вантажопотоці, а максимальне (крива 1) – при роботі конвеєра в двох дискретних станах: порожньому або повністю заповненому. При збільшенні до величини  $n = L / (T_n + T_o) \cdot 60v$  питома витрата електроенергії при одному і тому ж вантажопотоці на бремсберговому конвеєрі знижується. Також знижується питома витрата електроенергії при збільшенні кількості сумованих вантажопотоків, оскільки при цьому зменшуються інтервали відсутності вантажопотоку.

Резюмуючи матеріали гл. 2, слід зазначити, що отриманий результат дозволяє оцінювати енергоефективність конвеєрів без регулювання швидкості руху стрічки.

Для порівняння енергоефективності режимів роботи стрічкових конвеєрів ці режими слід доводити до загальних умов роботи: куту встановлення  $\beta=0$ , при цьому вплив опору руху частин  $\omega$  можна не враховувати. Одержано залежність (2.11) мінімального питомого електроспоживання конвеєра з певними умовами його встановлення, яка дозволяє визначити резерви енергоефективності, що досягають 40 – 60 %.

Алгоритм (рис. 2.4) дозволяє ідентифікувати хвилинні значення кількості вугілля, що надходить з очисного вибою, при використанні кореляційного зв'язку швидкості подачі комбайна від електричних навантажень комплексу. Алгоритм дозволяє отримати математичне сподівання хвилинних значень вантажопотоку з очисного вибою з точністю  $\pm 12$  % для крайніх значень та  $\pm 4$  % – для середніх з довірчою ймовірністю 0,95. При цьому точність визначення індивідуальних значень становить  $\pm 34$  % з довірчою ймовірністю 0,95. Даний алгоритм є базою методу встановлення енергоефективності магістрального конвеєрного транспорту



вугільних шахт і може бути використаний для визначення питомих витрат електроенергії конвеєрами, встановленими близько до горизонтальних або таких, котрі працюють на ухил, з урахуванням законів розподілу вугільних потоків у вузлах конвеєрної мережі. Після обґрунтування отриманих результатів бачимо, що при роботі одного очисного вибою вантажопотік розподіляється за нормальним законом, а для декількох вантажопотоків розподіл наближається до логарифмічного нормального закону.

Фактичне значення електроспоживання бремсбергового конвеєра може змінюватися в межах математичного сподівання до 30 % при вантажопотоці з одним і тим самим добовим обсягом вугілля. Ймовірна витрата електроенергії бремсбергового конвеєра може бути визначена з використанням параметра  $n$  (2.38) при розподілі вантажу на конвеєрній стрічці за біноміальним законом. Параметр  $n$  залежить від швидкості руху стрічки і довжини конвеєра, а також математичного сподівання часу надходження і відсутності на ньому вантажу. При одному і тому ж добовому обсязі переміщеного конвеєром вугілля зі збільшенням  $n$  питома електроспоживання знижується. Це важливий показник.

### 3. МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ КОНВЕЄРІВ ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ШВИДКОСТІ РУХУ СТРІЧКИ

#### 3.1. Вплив регульованого приводу на статистичні характеристики вантажопотоків у вузлах транспортної мережі

Регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки призводить до зміни статистичних характеристик вантажопотоку, які впливають на швидкість руху стрічки наступних конвеєрів і, як наслідок, на їх енергоефективність.

Взагалі вантажопотік, що виходить з очисного вибою, являє собою послідовність імпульсів випадкової довжини з випадковими інтервалами відсутності вантажу [18,19]. Вантажопотік можливо розглядати як безперервний випадковий процес. На рис. 3.1 зображена осцилограма вантажопотоку, змодельованого в пакеті SIMULINK MATLAB за алгоритмом, наведеним у роботі [74], і даними, отриманими в результаті натурного експерименту [12].

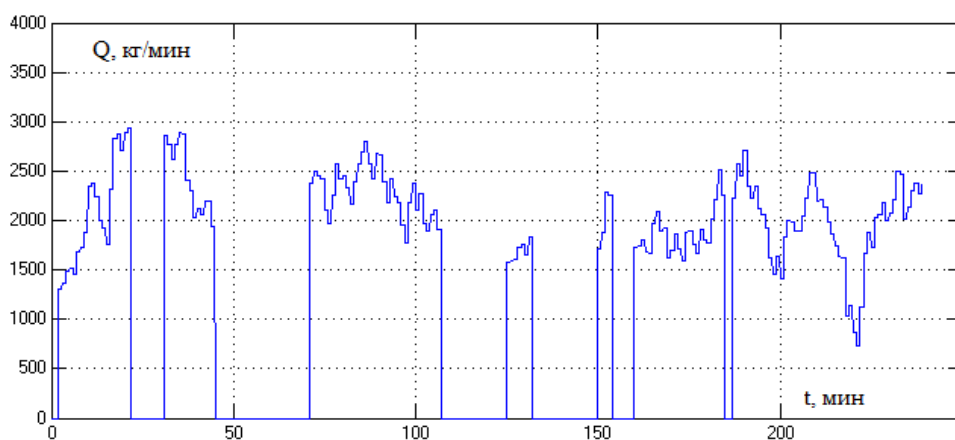


Рис. 3.1. Осцилограма реалізації транспортного вантажопотоку

Вираз для визначення щільності ймовірності розподілу вантажопотоку, що виходить з очисного вибою [18], такий:

$$p(Q) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \delta(0) + \frac{\mu}{\mu + \lambda} \times \frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right]^2, \quad (3.1)$$

де  $\delta(0)$  – дельта-функція, що описує ймовірність відсутності вантажопотоку;  $M_Q$  – математичне сподівання вантажопотоку;  $\sigma_Q = \sqrt{D_Q}$  середнє квадратичне відхилення вантажопотоку;  $D_Q$  – дисперсія вантажопотоку.

Використовуючи вираз (3.1), уточнимо закон розподілу потоку вугілля на кінці конвеєра при регульованій швидкості руху стрічки. Необхідність уточнення закону розподілу, пов'язана зі зміною технологічного режиму роботи конвеєра.

Конвеєр з регульованою швидкістю руху стрічки є ланкою запізнювання зі змінною затримкою, яка працює пропорційно вхідному вантажопотоку. При цьому після досягнення гірською масою кінця конвеєра вихідний потік формується ідентично вхідному з урахуванням того, що при постійній швидкості руху стрічки зміни обсягу вантажу, що надходить, доходять від початку до кінця за однакові проміжки часу, а при регулюванні швидкості руху стрічки передаються миттєво, оскільки рівень заповнення конвеєра по всій довжині весь час підтримується практично постійним. У той самий час за відсутності вхідного вантажопотоку в діючих системах такий режим роботи порушується, конвеєр повністю не зупиняється, а працює з мінімально можливою швидкістю, зазвичай в діапазон  $1/10 - 1/4$  від номінальної [44].

Для вивчення зазначених відмінностей введемо параметр "коефіцієнт швидкості"  $K_{ск}$ , який враховує "глибину" регулювання швидкості в період ненадходження гірської маси на конвеєр. Коефіцієнт  $K_{ск}$  – це відношення мінімально можливої швидкості руху до швидкості, яка встановлюється системою регулювання при величині вантажопотоку, що відповідає його математичному сподіванню. Змінна величина  $K_{ск}$  чисельно обернено пропорційна величині  $D$ , яка в теорії приводу відома як "глибина" регулювання [75]. Коефіцієнт  $K_{ск}$  дозволяє записати відому формулу для визначення щільності ймовірності закону розподілу швидкості руху конвеєрної стрічки при її регулюванні як

$$p(v_k) = \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \delta(0) \cdot K_{ск} \cdot v_{ном} + \frac{\mu}{\mu + \lambda} \times \frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right]^2 \cdot v_{ном} \quad (3.2)$$

де  $v_{ном}$  – швидкість, яка відповідає математичному сподіванню  $M_Q$  вантажу, що надходить на конвеєр.

За наявної щільності ймовірності розподілу вантажопотоку згідно з виразом (3.1) і щільності ймовірності розподілу швидкості стрічки відповідно до виразу (3.2) вугілля, котре надходить на стрічку, буде розподілятися таким чином: у періоди надходження гірської маси конвеєр заповнюється рівномірно на заздалегідь обраний рівень (назвемо його "максимальний"), швидкість підтримується пропорційною вхідному потоку; в періоди відсутності надходження гірської маси конвеєр не заповнюється, швидкість підтримується мінімальною. Для опису погонного розподілу вантажу на конвеєрній стрічці введемо допущення, що конвеєр нескінченний, при цьому середні значення інтервалів відсутності і наявності вантажу на стрічці будуть прагнути до значень їхнього математичного сподівання. З імовірністю  $\mu/(\mu + \lambda \cdot K_{ск})$  погонне навантаження буде на "максимальному" рівні, а з імовірністю  $\lambda \cdot K_{ск} / (\mu + \lambda \cdot K_{ск})$  погонне навантаження буде відсутнє.

Тут слід обґрунтувати довжину конвеєра, більш якої вантаж на ньому буде розподілятися як на умовно "нескінченному" з імовірністю в 95 %, що спрощує вигляд виразу щільності ймовірності вантажопотоку. Як відомо з математичної статистики, при експоненційному законі розподілу значення ймовірності 95 % відповідає значенню  $\ln(20)/\lambda \approx 3/\lambda$  випадкової величини. Якщо час надходження вантажу перевищує час його транспортування, то заповнена ділянка на конвеєрі обмежується довжиною конвеєра (рис 3.2).

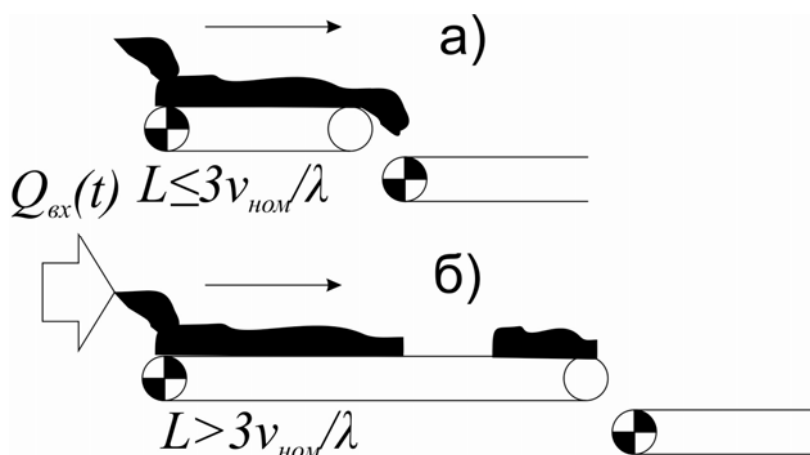


Рис. 3.2. Процес розподілу вантажу на конвеєрі при різних відношеннях довжини і швидкості транспортування до ймовірності стану надходження вантажу, якщо довжина конвеєра  $L \leq 3v_{ном}/\lambda$  (а) та  $L > 3v_{ном}/\lambda$  (б)

Викладене свідчить, якщо потроєний добуток математичного сподівання часу надходження вантажу на швидкість транспортування (що відповідає математичному сподіванню величини потоку в період надходження) менше довжини конвеєра, то з імовірністю 95 % його можна вважати умовно "нескінченним", тобто 95 % всіх періодів надходження повністю "укладаються" на довжині конвеєра. В іншому разі необхідно враховувати довжину конвеєра, яка впливає на експоненціальний розподіл [18] величини інтервалів відсутності і наявності вантажу на конвеєрній стрічці.

Схема формування характеристик вантажопотоку після конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки наведено на рис. 3.3.

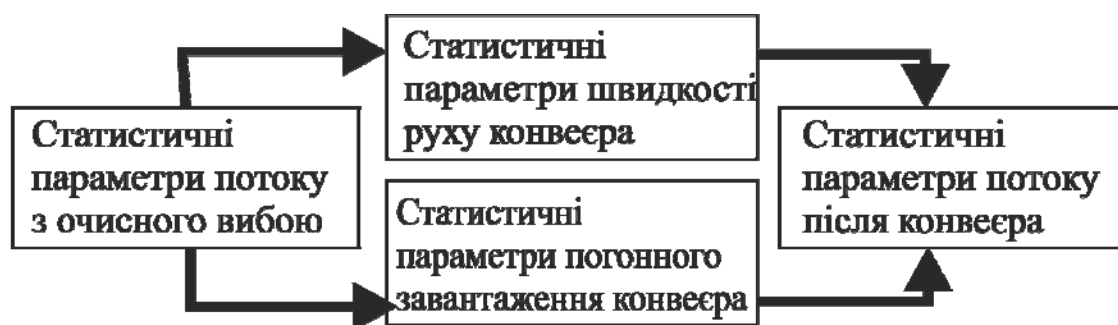


Рис. 3.3. Блок – схема формування характеристик вантажопотоку після конвеєра з регульованим приводом

При довжині конвеєра  $l > 3T_{\Pi} v_{ном}$  (умовно нескінченний конвеєр) щільність імовірності вихідного вантажопотоку описується виразом, що впливає з композиції щільності ймовірності закону розподілу швидкості руху стрічки і закону розподілу погонного навантаження конвеєра, тобто

$$p(Q_{вих}) = \frac{\lambda \cdot K_{ск}}{\lambda \cdot K_{ск} + \mu} \cdot \delta(0) + \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \cdot (K_{ск} \cdot M_{Q'}) +$$

$$+ \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\mu}{\mu + \lambda} \cdot \frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right] \quad (3.3)$$

У виразі (3.3) імовірність наявності погонного навантаження на "максимальному" рівні  $\frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\lambda}{\mu + \lambda} + \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\mu}{\mu + \lambda}$  представимо

двома складовими:  $\frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\lambda}{\mu + \lambda}$  і  $\frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\mu}{\mu + \lambda}$ , які

відповідають можливостям відсутності і наявності вантажу на вході конвеєра. Таким чином, коли на вході потік відсутній, то на виході є потік з мінімальним рівнем  $(K_{ск} \cdot M_{Q'})$ , а коли потік присутній, то на

виході є потік, аналогічний вхідному:  $\frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right]^2$ .

Аналізуючи вираз (3.3), можна стверджувати, що математичне сподівання вірогідності відсутності вантажу після конвеєра з регульованою швидкість руху зменшилося з  $\lambda / (\lambda + \mu)$  для вхідного до  $\lambda \cdot K_{ск} / (\lambda \cdot K_{ск} + \mu)$  для вихідного потоків. При значеннях  $\lambda = 0,25$  та  $\mu = 0,164$  (приймавши  $K_{ск} = 0,1$ ), отриманих у ході експерименту на шахті "Павлоградська", для потоку вугілля, видобутого з очисного вибою, маємо, що  $\lambda / (\lambda + \mu) = 0,604$  та  $\lambda \cdot K_{ск} / (\lambda \cdot K_{ск} + \mu) = 0,132$ . Цікавим є те, що час роботи наступного конвеєра з регульованим приводом на мінімальній швидкості, яка визначається коефіцієнтом  $K_{ск}$ , збільшиться з  $\lambda / (\lambda + \mu)$  до  $\frac{\lambda \cdot K_{ск}}{\lambda \cdot K_{ск} + \mu} + \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\lambda}{\mu + \lambda}$ , та для розглянутих раніше значень  $\lambda$  та  $\mu$  складуть 0,604 і 0,656 відповідно. Це означає, що регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки на послідовно встановлених конвеєрах забезпечує додаткове зниження витрат електроенергії за рахунок збільшення часу роботи кожного наступного конвеєра з мінімальною швидкістю.

Від випадку "нескінченного" конвеєра перейдемо до реального конвеєра з кінцевою довжиною. Якщо конвеєр не "нескінченний", то математичне сподівання інтервалів наявності та відсутності вантажу на конвеєрі можна записати так:

$$T_n / \left( 1 - \exp \left( -\frac{l}{v_{ном}} \right) \right); \quad (3.4)$$

$$T_0 / \left( 1 - \exp \left( -\frac{l}{v_{ном} K_{ск}} \right) \right), \quad (3.5)$$

де  $l$  – довжина конвеєра, м;  $v_{ном}$  – швидкість конвеєра при надходженні математичного сподівання вантажопотоку, м/с.

Вирази (3.4), (3.5) відповідають експоненціальному закону розподілу тривалості періодів надходження та відсутності вугілля з очисного вибою [18].

При довжині конвеєра  $l \leq 3T_{II}v_{ном}$ , використовуючи формулу (3.3) та помножуючи відповідні значення ймовірності надходження та відсутності вантажу на вирази (3.4) та (3.5), отримаємо:

$$\begin{aligned}
 p(Q_{вбл}) = & \frac{\lambda \left( 1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{ном} K_{ск}}\right) \right) \cdot K_{ск}}{\lambda \left( 1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{ном} K_{ск}}\right) \right) \cdot K_{ск} + \mu \left( 1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{ном}}\right) \right)} \cdot \delta(0) + \\
 & + \frac{\mu \left( 1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{ном}}\right) \right)}{\mu \left( 1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{ном}}\right) \right) + \lambda \left( 1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{ном} K_{ск}}\right) \right) \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\lambda}{\mu + \lambda} \cdot (K_{ск} \cdot M_Q) + \\
 & + \frac{\mu \left( 1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{ном}}\right) \right)}{\mu \left( 1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{ном}}\right) \right) + \lambda \left( 1 - \exp\left(-\frac{l}{v_{ном} K_{ск}}\right) \right) \cdot K_{ск}} \cdot \frac{\mu}{\mu + \lambda} \cdot \frac{1}{Q \sigma_Q \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(Q - M_Q)^2}{2\sigma_Q^2}\right]^2
 \end{aligned} \quad (3.6)$$

Вираз (3.6) є загальним видом щільності ймовірності розподілу вантажопотоку після конвеєра з регульованим приводом. При зменшенні відношення довжини конвеєра до номінальної швидкості вираз (3.6) вироджується в окремий випадок – вираз (3.3).

При довжині конвеєра меншій, ніж  $3T_{II}v_{ном}$  (з рис. 3.2), розподіл погонного навантаження на конвеєрі зі зменшенням його довжини буде наближатися до подібного конвеєра з нерегульованою швидкістю руху стрічки. Формули (3.3), (3.6) є моделлю для визначення характеристик вантажопотоку після конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки, який приймає вугілля з однієї лави.

Використовуючи вираз (3.3), визначимо щільність імовірності вантажопотоку після його проходження через  $k$  конвеєрів. Інтервал відсутності вантажопотоку зменшується після кожного конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки в  $K_{ск}$  разів. Тому ймовірність

відсутності вантажопотоку після  $k$ -го підряд встановленого конвеєра дорівнює  $\lambda \cdot K_{ск}^k / (\lambda \cdot K_{ск}^k + \mu)$ . Припустимо, що послідовно встановлені конвеєри однакові, щільність імовірності вантажопотоку після кожного конвеєра можна визначити так:

$$p(Q_{вих}) = \frac{\lambda \cdot K_{ск}^k}{\lambda \cdot K_{ск}^k + \mu} \cdot \delta(0) + \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}^k} \cdot p(v_{\min(k-1)}) \cdot (K_{ск} \cdot M_{Q'}) +$$

$$+ \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{ск}^k} \cdot [1 - p(v_{\min(k-1)})] \cdot \frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right] \quad (3.7)$$

де  $k$  – порядковий номер конвеєра;  $p(v_{\min(k-1)})$  – імовірність руху з мінімальною швидкістю попереднього за напрямком руху вантажопотоку конвеєра.

Імовірнісний розподіл результуючого потоку у вузлах транспортуючої схеми при підсумовуванні  $n$  регульованих и  $m$  нерегульованих потоків (рис. 3.4) визначимо з урахуванням виразів (3.3), (3.6), (3.7).

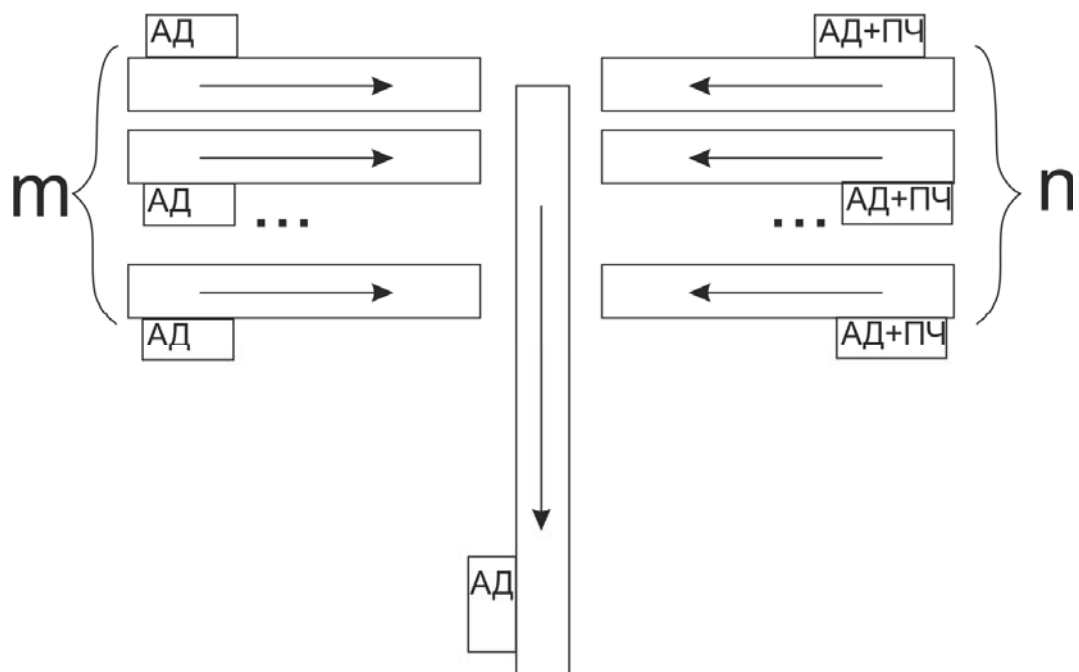


Рис. 3.4 Блок – схема транспортуючої мережі при злитті вугільних потоків з  $n$  регульованих та  $m$  нерегульованих приводом конвеєрів: АД – асинхронний двигун, АД+ПЧ – асинхронний двигун з перетворювачем частоти



Для визначення ймовірнісних характеристик вантажопотоків у вузлах системи магістрального транспорту зробимо такі припущення: після нерегульованого конвеєра, що приймає вугілля з однієї лави, виходить потік, який має два дискретних стани:

- відсутність потоку;
- наявність потоку на рівні математичного сподівання та флуктуацій навколо цього значення.

Після конвеєрів з регульованою швидкістю утворюється вантажопотік, який має три дискретних стани:

- відсутність потоку;
- величина математичного сподівання надходження вантажу на конвеєр (включаючи флуктуації);
- наявність вантажопотоку на рівні  $(K_{ck} \cdot M_Q)$  у періоди відсутності на вході та наявності на виході конвеєра гірської маси.

У цьому разі для визначення статистичних характеристик результуючого (сумарного) вантажопотоку можна використовувати складові виразів (3.3), (3.6), (3.7). Сформуємо для  $n$  регульованих вантажопотоків два масиви значень. У першому виразі (3.8) за стовпцями записуються вірогідності відсутності вантажопотоку, наявності на мінімальному рівні та на рівні математичного сподівання, за рядками – номери вантажопотоків. У другому виразі (3.9) за стовпцями записуються відповідні математичні сподівання рівнів надходження вантажопотоків, по рядках – те саме, що і для першого масиву значень. Розробимо алгоритм, необхідний для розрахунку добутку відповідних ймовірностей наявності результуючого вантажопотоку на певному рівні або його відсутності. Даний прийом використовується, зважаючи на нелінійні залежності електроспоживання конвеєра, при регулюванні швидкості руху стрічки залежно від завантаження. При цьому необхідно враховувати кожен рівень завантаження конвеєра окремо. Для цього використані методи додавання і множення ймовірностей [72]:

$$n_{вер} = \begin{pmatrix} \frac{\lambda_1 \cdot K_{ck1}}{\lambda_1 \cdot K_{ck1} + \mu_1} & \frac{\mu_1}{\lambda_1 \cdot K_{ck1} + \mu_1} \cdot \frac{\lambda_1}{\mu_1 + \lambda_1} & \frac{\mu_1}{\lambda_1 \cdot K_{ck1} + \mu_1} \cdot \frac{\mu_1}{\lambda_1 + \mu_1} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\lambda_i \cdot K_{cki}}{\lambda_i \cdot K_{cki} + \mu_i} & \frac{\mu_i}{\lambda_i \cdot K_{cki} + \mu_i} \cdot \frac{\lambda_i}{\mu_i + \lambda_i} & \frac{\mu_i}{\lambda_i \cdot K_{cki} + \mu_i} \cdot \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} \end{pmatrix} \quad (3.8)$$

$$n_{yp} = \begin{pmatrix} 0 & K_{ck1} \cdot M_{Q'1} & M_{Q'1} \text{ или } \left( \frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right] \right)^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 0 & K_{cki} \cdot M_{Q'i} & M_{Q'i} \text{ или } \left( \frac{1}{Q' \sigma_{Q'} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{(Q' - M_{Q'})^2}{2\sigma_{Q'}^2} \right] \right)^2 \end{pmatrix} \quad (3.9)$$

де  $\lambda_i \cdot \Delta t$  – імовірність переходу від 1 до 0  $i$ -го потоку вугілля;  $\mu_i \cdot \Delta t$  – імовірність переходу від 0 до 1  $i$ -го потоку вугілля;  $\Delta t$  – інтервал часу, що розглядається;  $M_{Q'i}$  – математичне сподівання значень  $i$ -го вантажопотоку;  $\sigma_{Q'}$  – середнє квадратичне відхилення.

Для конвеєрів з нерегульованою швидкістю руху стрічки сформуємо такі масиви, які відрізняються тим, що другий стовпець у них буде дорівнювати нулю, оскільки в потоці після конвеєра з нерегульованою швидкістю руху стрічки існують лише два дискретних стани. У загальному випадку в кожен з масивів вносяться характеристики вантажопотоків після всіх конвеєрів. Алгоритм, наведений на рис. 3.5, дозволяє визначити щільність імовірності хвилинних значень корисних копалин у вузлах транспортної схеми при підсумовуванні декількох вантажопотоків.

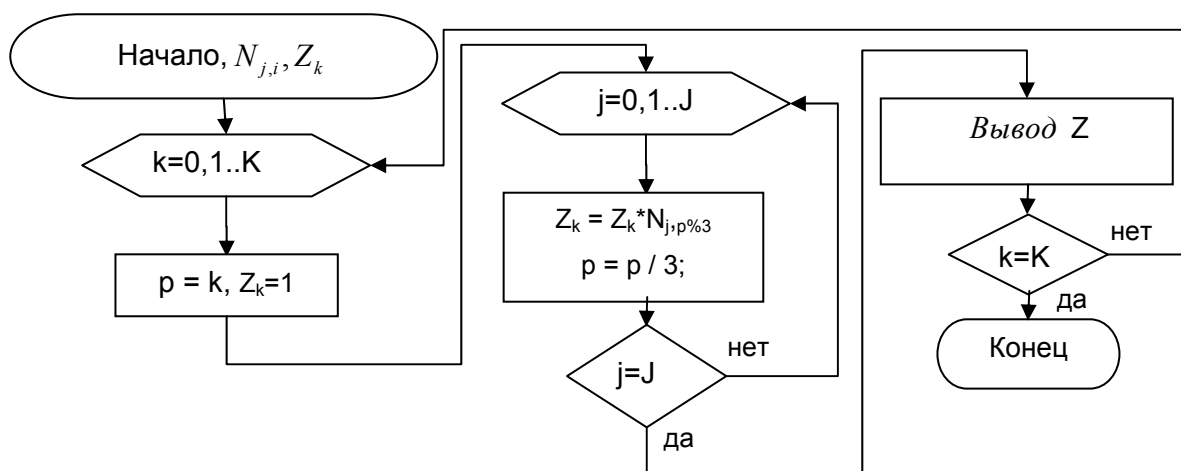


Рис. 3.5. Алгоритм визначення значень щільності ймовірності при підсумовуванні декількох вантажопотоків, які формуються після конвеєрів з регульованим та нерегульованим приводом

Алгоритм працює таким чином. Масив імовірностей знаходження вантажопотоків на певному рівні  $N_{j,i}$  є початковим, де  $i$  – кількість вантажопотоків;  $j$  – кількість дискретних рівнів кожного вантажопотоку;  $Z_k$  – порожній масив ймовірності рівнів сумарного вантажопотоку;  $K = j^i$ . Для кожного значення  $Z_k$  визначають добуток  $k$ -ї ймовірності результуючого потоку та  $j$ -ї ймовірності початкового  $p$ -го потоку, де  $p$  приймає значення від  $k$  до 1, при проходженні кожного циклу зменшуючись в три рази,  $\%$  – операція цілочисельного ділення.

Дискретні рівні результуючого потоку  $Z_{yp}$  отримані шляхом підсумовування елементів масиву  $n_{yp}$ , для яких визначається добуток відповідних ймовірностей з масиву  $n_{вер}$ . Алгоритм обробки фактично повторює принцип роботи з масивом  $n_{вер}$ , але визначається не добутком певних елементів початкового масиву, а їх сумою.

Для перевірки точності запропонованого алгоритму виконано моделювання за розробленою в розділі 4 імітаційною моделлю для випадку з чотирьох регульованих конвеєрів (рис. 3.6), на які надходить вугілля з чотирьох незалежних очисних вибоїв.

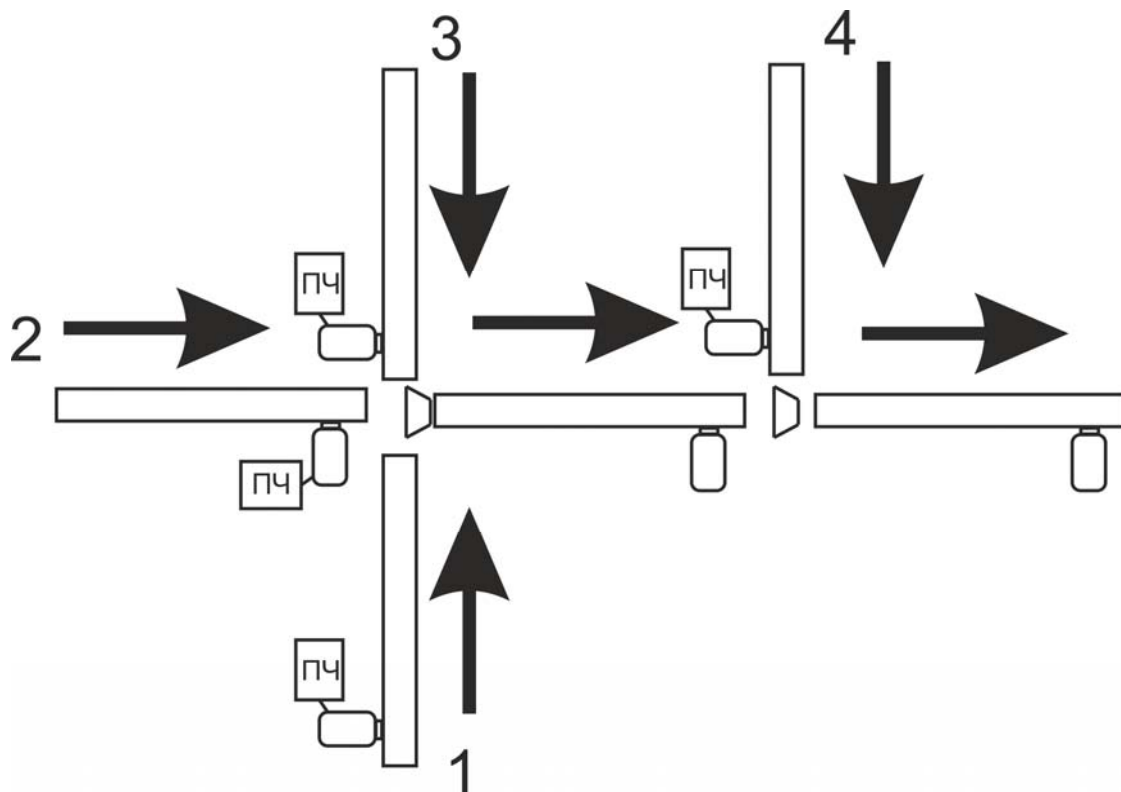


Рис. 3.6. Розрахункова схема для моделювання вантажопотоків

Підсумовувалися вантажопотоки в один вузол транспортної схеми. Параметри потоків однакові та прийнято:  $\lambda = 0,25$ ,  $\mu = 0,164$ ,  $M(Q) = 3420$  кг/хв,  $D(Q) = 202500$  (кг/хв)<sup>2</sup>. Отриманий за допомогою імітаційної моделі за добу (рис. 3.7) з похибкою до 10 % вантажопотік збігається з розрахунковим при використанні запропонованого алгоритму (рис. 3.5), що свідчить про прийнятність запропонованого підходу.

На рис. 3.7 зображений змодельований сумарний потік, з чотирьох лав за період в десять годин, з дискретністю надходження вантажу в 1 хв. Кожен потік проходить через один конвеєр з регульованою швидкістю руху стрічки. Конвеєри з нерегульованою швидкістю руху стрічки не вносять змін до статистичних характеристик вантажопотоків.

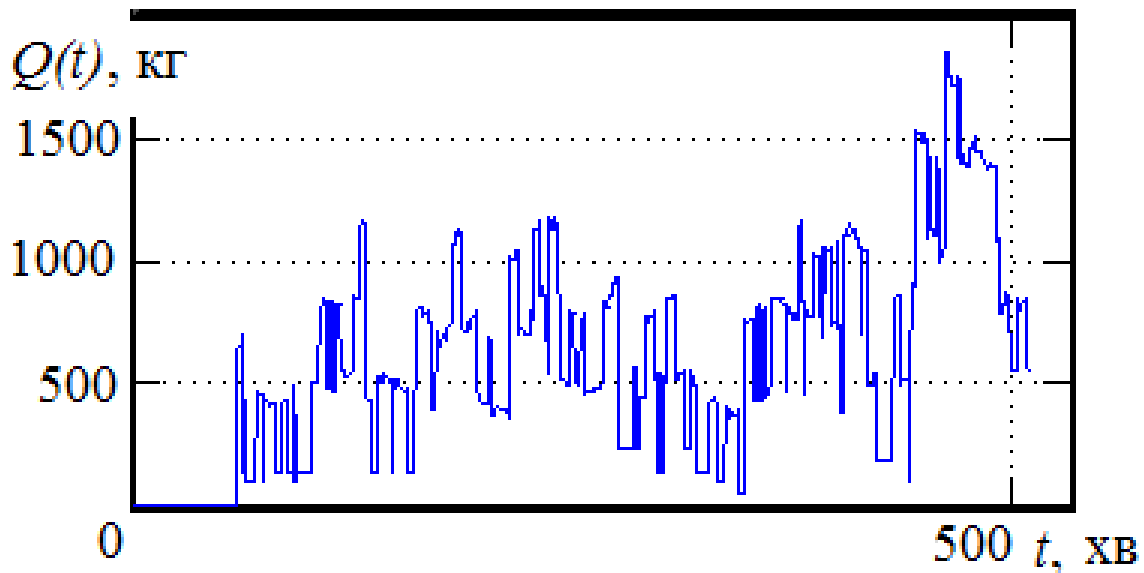


Рис. 3.7. Змодельований в пакеті MATLAB Simulink сумарний потік вугілля, видобутого з чотирьох лав

Таким чином, отримані вирази та алгоритми для визначення значень щільності ймовірності розподілу вантажопотоків у вузлах транспортної схеми при відомих законах розподілу вугільного потоку, що виходить з кожного очисного вибою, які дозволять оцінити електроспоживання конвеєрів з регульованою швидкістю руху стрічки.

### 3.2. Підвищення енергоефективності транспортування вантажу магістральними конвеєрами при використанні регульованого приводу

Зміна статистичних характеристик вантажопотоків за допомогою регульованого приводу впливає на електроспоживання шахтних конвеєрів, що обґрунтовано в першому розділі. Встановимо вплив регульованої швидкості руху стрічки і характеристик надходження вантажу на електроспоживання конвеєра у зв'язку з впровадженням ЧРП на магістральному транспорті вугільних шахт. Існуючі моделі визначення електроспоживання при регульованій швидкості руху стрічки не враховують характеристик вантажопотоків, що сприймає конвеєр. Приймаємо припущення, що залежність зусилля, необхідного для пересування частин конвеєра від маси вантажу на конвеєрі має лінійний характер, див. вираз (2.38). Швидкість руху стрічки є функцією від вантажопотоку, тобто

$$v_k(Q_i) = \begin{cases} K_{\Pi} \cdot Q_i(t_i) & \text{при } Q_i(t_i) > 0 \\ K_{ск} \cdot v_{НОМ} & \text{при } Q_i(t_i) = 0 \end{cases} \quad (3.10)$$

де  $K_{\Pi}$  – коефіцієнт пропорційності, м/кг.

Маса вантажу на конвеєрі при регульованій швидкості руху стрічки визначається чисельними методами [47], оскільки залежить від змінної транспортної затримки:

$$QS = f(Q(t), v_k(Q(t))). \quad (3.11)$$

Електроспоживання конвеєра за добу або зміну

$$W = F(QS[Q(t_i), Q(t_{i-1}), Q(t_{i-\tau}), v_k(Q(t_i))]) \cdot v_k(Q(t_i)) \cdot t, \quad (3.12)$$

де  $Q(t_{i-\tau})$  – значення процесу  $Q(t)$ , які відстають від  $Q(t_i)$  на величину змінної транспортної затримки  $\tau$ .

Використовуючи вирази щільності ймовірності розподілу вантажопотоку (3.6) та швидкості руху стрічки конвеєра (3.2), визначаємо витрату електроенергії за формулою

$$W = F(p(QS) \cdot QS_{\text{МАКС}} \cdot l) \cdot p(v_k) \cdot v_{\text{НОМ}} \cdot t, \quad (3.13)$$

де  $p(QS)$  – щільність ймовірності розподілу погонного навантаження;  
 $QS_{\text{МАКС}}$  – максимально можлива маса вантажу на конвеєрі, кг.

Наприклад, щільність ймовірності розподілу погонного навантаження на конвеєрі при надходженні вугілля з одного очисного вибою

$$p(QS) = \frac{\lambda \cdot K_{\text{СК}}}{\lambda \cdot K_{\text{СК}} + \mu} \cdot \delta(0) + \frac{\mu}{\mu + \lambda \cdot K_{\text{СК}}} \cdot (QS_{\text{МАКС}}), \quad (3.14)$$

Порівняємо показники енергоефективності стрічкових конвеєрів з регульованою і нерегульованою швидкістю руху стрічки при відомих параметрах їх установа та вантажопотоках, використовуючи рис. 3.8 [76]. Параметри установа конвеєрів однакові:  $q''_p = 9,2$  кг/м;  $q'_p = 20$  кг/м;  $q_l = 15$  кг/м;  $c' = 1,1$ ;  $\omega = 0,06$ ;  $\beta = 0^\circ$ ;  $v = 2$  м/с,  $L = 1$  км. Параметри вантажопотоку, що виходить з очисного вибою:  $\lambda = 0,25$ ,  $\mu = 0,164$ ,  $M(Q) = 3420$  кг/хв,  $D(Q) = 202500$  (кг/хв)<sup>2</sup>. Розрахунок характеристик потоку у вузлах лінії конвеєрів з регульованою швидкістю руху стрічки виконуємо відповідно до виразу (3.8).

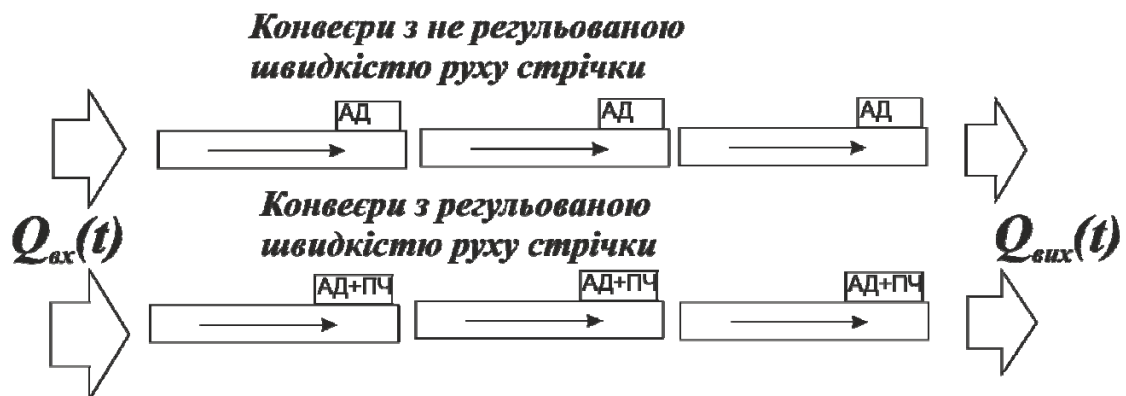


Рис. 3.8. Схема розташування конвеєрів для розрахунку їх електроспоживання: АД – асинхронний двигун; АД+ПЧ – асинхронний двигун з перетворювачем частоти;  $Q_{\text{вх}}(t)$  та  $Q_{\text{вих}}(t)$  – вхідний і вихідний вугільні потоки, залежні від часу.

Визначимо характер зниження рівня електроспоживання встановлених поспіль конвеєрів з регульованою швидкістю руху стрічки (рис. 3.9) за залежностями (3.7), (3.13), приймаючи  $K_{\text{СК}} = 0,25$ .

Наведені на рис. 3.9 розрахункові значення апроксимуються кривою з коефіцієнтом детермінації  $R^2=0,98$ :

$$w_{y\partial} = 0,13687 \cdot e^{-1,113k} + 0,345. \quad (3.15)$$

Характер залежності зниження рівня питомого електроспоживання разом встановлених конвеєрів з регульованою швидкістю руху стрічки – експоненціальний з точністю  $\pm 2\%$ . Зниження витрат електроенергії досягається за рахунок збільшення часу руху стрічки на мінімальній швидкості наступного в лінії конвеєра.

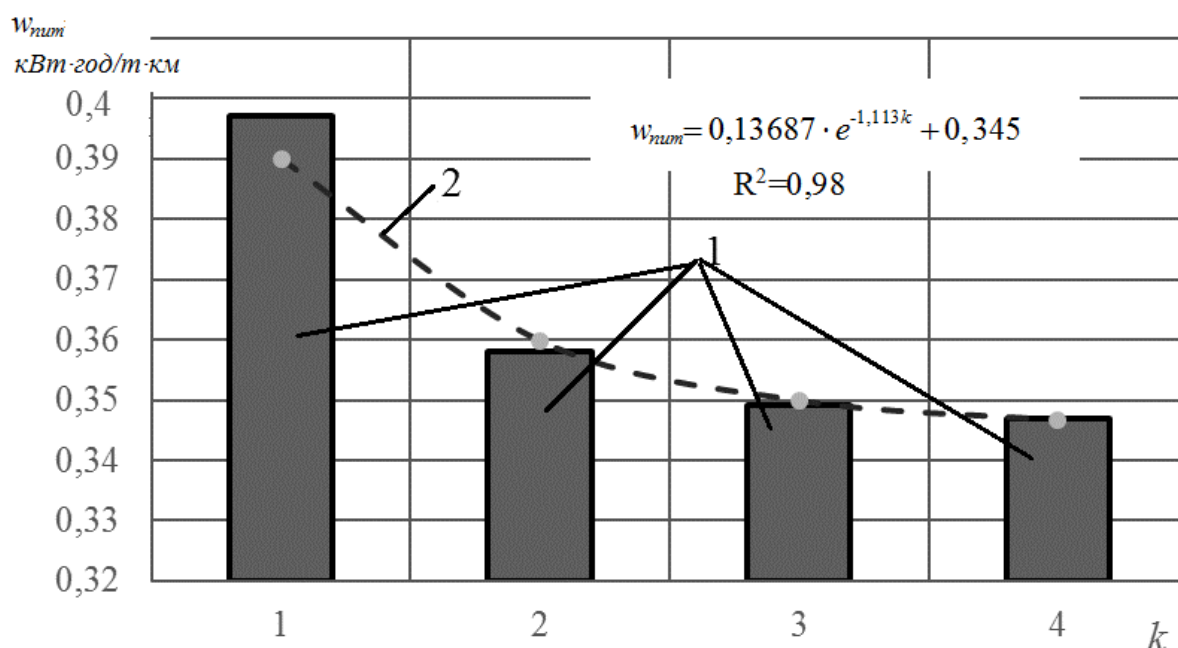


Рис. 3.9. Криві залежності питомої витрати електроенергії  $k$ -м конвеєром лінії з регульованою швидкістю руху стрічки, які отримані розрахунковим шляхом (1) та шляхом апроксимації (2)

Отриманий результат дозволяє стверджувати що більш повне використання резерву енергоефективності спостерігається при регулюванні швидкості руху стрічки поспіль встановлених конвеєрів. Зі збільшенням кількості конвеєрів у лінії витрата електроенергії знижується та досягає граничного значення, яке обмежується мінімальною швидкістю руху стрічки.

Наведена на рис. 3.10 гістограма демонструє зниження витрат електроенергії магістральними конвеєрами при регулюванні швидкості руху стрічки пропорційно грузопотоку, а також

збільшення кількості підсумовуваних вантажопотоків, кожен з яких описується виразом (3.1) [77,78].

Для побудови графіка питомої витрати електроенергії приймаємо, що параметри встановлення конвеєрів однакові, тобто  $q''_p = 9,2$  кг/м;  $q'_p = 20$  кг/м;  $q_n = 15$  кг/м;  $c' = 1,1$ ;  $\omega = 0,06$ ;  $\beta = 0^\circ$ ;  $v = 2$  м/с,  $L = 1$  км, параметри вантажопотоку, що виходить з кожного очисного вибою, такі:  $\lambda = 0,25$ ,  $\mu = 0,164$ ,  $M(Q) = 3420$  кг/хв,  $D(Q) = 202500$  (кг/хв)<sup>2</sup>.

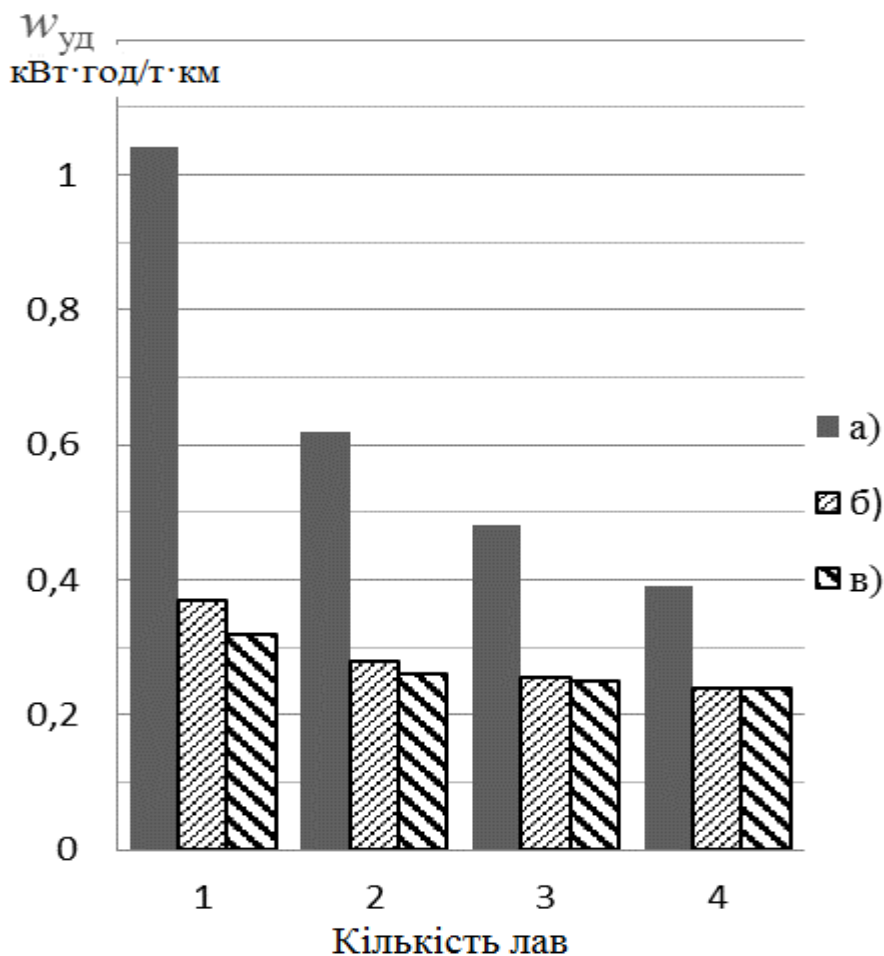


Рис. 3.10. Гістограма залежності питомої витрати електроенергії на транспортування гірської маси від кількості підсумованих вантажопотоків та регулювання швидкості руху стрічки конвеєрів: а) — електроспоживання конвеєра при відсутності регулювання швидкості руху стрічки; б) — електроспоживання першого в лінії конвеєра з регулюванням швидкості руху стрічки; в) — електроспоживання другого в лінії конвеєра з регулюванням швидкості руху стрічки

З аналізу рис. 3.10 випливає, що при підсумовуванні вантажопотоків ефект від регулювання швидкості руху стрічок на



послідовно встановлених конвеєрах знижується (різниця між сусідніми стовпцями (б) та (в) на рис. 3.10).

Аналітично доведено (рис. 3.9) та підтверджено на імітаційній моделі (розробленої в п. 4.2), що встановлення регульованого приводу в ланцюзі конвеєрів (при пропорційному регулюванні) дозволяє додатково знизити витрату електроенергії за рахунок роботи наступного конвеєра більш тривалий час на мінімальній швидкості. При зменшенні довжини конвеєрів у лінії ефект нівелюється, що є наслідком кореляції вхідного і вихідного з конвеєра вантажопотоків.

Проаналізуємо вплив зміни характеристик вантажопотоків на енергоефективність бремсбергових конвеєрів [79]. Особливістю бремсбергових конвеєрів є зниження їх питомого електроспоживання при вирівнюванні вантажопотоку, який надходить, що обґрунтовано в п. 2.4. Як показано в п. 3.1, з боку розвантаження конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки знижується ймовірність відсутності вантажопотоку, а також вантажопотоку, близького до максимального. Наприклад, якщо вихідний вантажопотік має параметри  $T_n = 4$  хв і  $T_0 = 6$  хв, а математичне сподівання під час надходження – 3,7 т/хв, то після проходження конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки вантажопотоку відповідають параметри  $T_n = 12$  хв і  $T_0 = 2,3$  хв, а математичне сподівання маси вантажу під час надходження – 2,8 т/хв. Частка часу надходження вантажопотоку –  $K_m = 0,83$ . Розраховуються ці значення за виразом (3.3). Якщо змінений регульованою швидкістю руху стрічки вантажопотік у подальшому буде рухатися за допомогою бремсбергового конвеєра з параметрами  $q''_p = 9,2$  кг/м;  $q'_p = 20$  кг/м;  $q_l = 15$  кг/м;  $\omega = 0,06$  с' = 1,1;  $L = 1000$  м;  $\beta = -6^\circ$ ;  $v = 2$  м/с, то електроспоживання конвеєра буде знижено до 9 % у порівнянні з величиною електроспоживання при русі незмінного вантажопотоку, та визначається за залежностями (2.34), (2.35), (2.40), (2.41).

Розглянемо вплив характеристик вантажопотоку, який надходить, на електроспоживання бремсбергового конвеєра. Схема встановлення конвеєрів для розрахунку наведена на рис. 3.11. Використовуємо співвідношення (2.34), (2.35), (2.40), (2.41), (3.1), (3.3), (3.7).

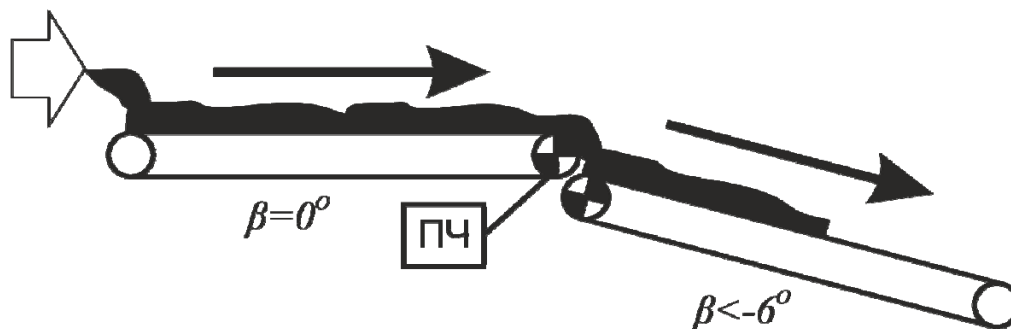


Рис. 3.11 Розрахункова схема для визначення енергоефективності бремсбергового конвеєра, який встановлений після конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки

При регулюванні швидкості руху конвеєрної стрічки пропорційно вантажопотоку величина математичного сподівання вантажопотоку знижується. На рис. 3.12 наведена залежність величини математичного сподівання вантажопотоку на виході конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки від «коефіцієнта швидкості»  $K_{ск}$  для трьох пар значень  $(\lambda, \mu)$  при математичному сподіванні вантажопотоку, що надходить,  $M(Q) = 3700$  кг/хв. Аналізуючи залежності на рис. 3.12, можна зробити висновок, що (при зменшенні  $K_{ск}$ ) інтенсивність зниження математичного сподівання вихідного вантажопотоку вища при більш тривалому інтервалі відсутності вхідного вантажопотоку (більшою  $\lambda$ ).

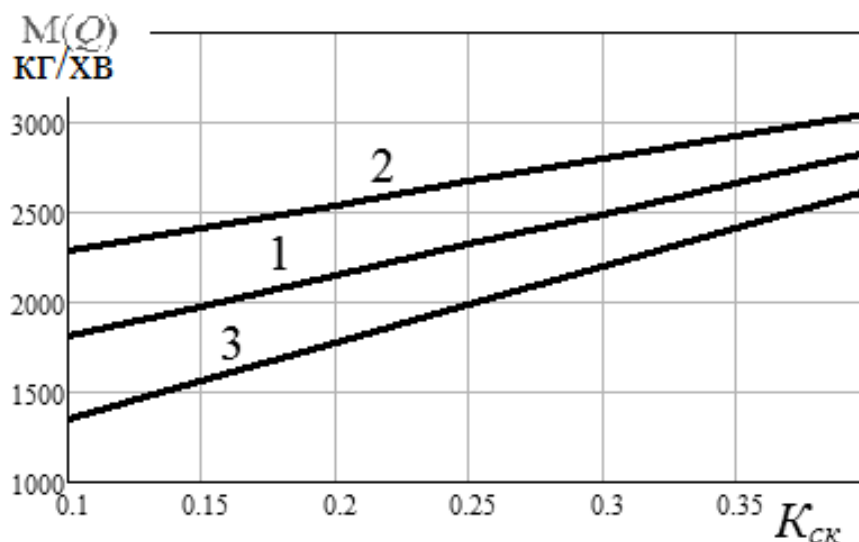


Рис. 3.12. Криві залежності математичного очікування вантажопотоку на виході конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки від коефіцієнта швидкості  $K_{ск}$ : 1 –  $\lambda = 0,25$ ,  $\mu = 0,164$ ; 2 –  $\lambda = 0,175$ ,  $\mu = 0,21$ ; 3 –  $\lambda = 0,325$ ,  $\mu = 0,108$

Для параметрів  $\lambda = 0,25$ ,  $\mu = 0,164$ ,  $M(Q) = 3700$  кг/хв,  $K_{ск} = 0,25$  залежність математичного очікування хвилинних значень від частки часу надходження вантажопотоку при регулюванні швидкості руху стрічки наведена на рис. 3.13:

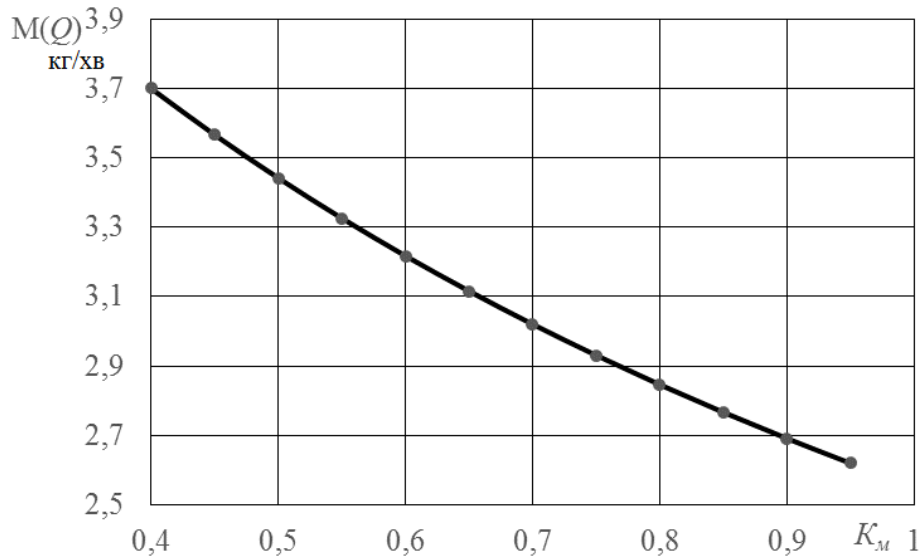


Рис. 3.13. Крива залежності математичного сподівання хвилинних значень вантажопотоку від частки часу надходження вантажу

Залежність питомого електроспоживання бремсбергового конвеєра, який встановлений після конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки, від частки часу надходження вантажу має вигляд як на рис. 3.14.

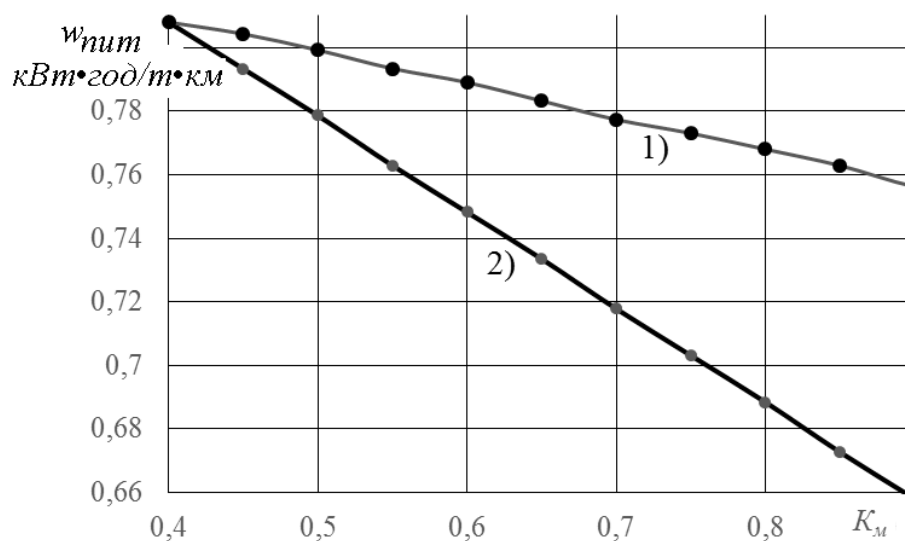


Рис. 3.14. Крива залежності питомої витрати електроенергії бремсбергового конвеєра від коефіцієнта  $K_m$  при  $K_{ск}=0,1$  (1) та при  $K_{ск}=0,25$  конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки (2)

Наведена на рис. 3.13 крива свідчить про зниження величини математичного сподівання вантажу при збільшенні інтервалів надходження вантажопотоку після конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки.

Графіки, що розглянуті на рис. 3.14, мають лінійний характер, а це демонструє прямо пропорційну залежність зниження питомої витрати електроенергії бремсбергового конвеєром від частки часу надходження вантажу, за умови вирівнювання вантажопотоку конвеєром з регульованою швидкістю руху стрічки. Характер залежності на відміну від канонічного гіперболічного [76] пояснюється лише частковим вирівнюванням вантажопотоку: після конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки рівні хвилинних значень вантажопотоку перерозподіляються.

Залежність питомого електроспоживання бремсбергового конвеєра від кута його встановлення при надходженні вантажу на конвеєр з регульованою швидкістю руху стрічки та параметрами  $\lambda = 0,25$ ,  $\mu = 0,164$ ,  $K_{ск} = 0,25$ ,  $\omega = 0,04$  розглянута на рис. 3.15.

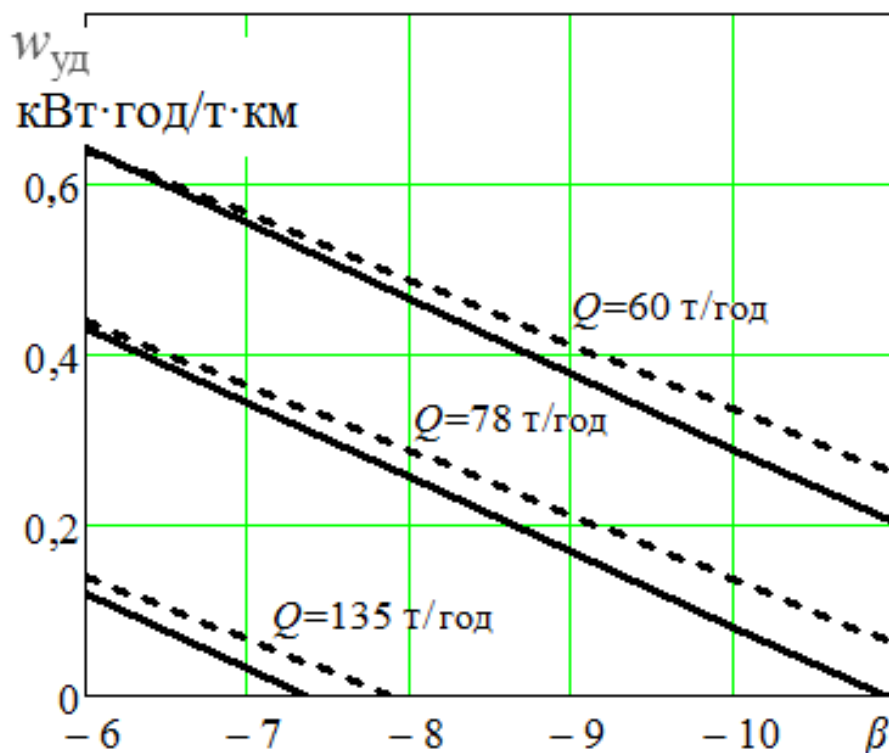


Рис. 3.15. Графіки залежності питомого електроспоживання бремсбергового конвеєра від кута його встановлення при надходженні вугілля безпосередньо з очисного вибою (пунктирна лінія) та за схемою, зображеною на рис. 3.11 (суцільна лінія)

Аналізуючи графіки (рис. 3.15), можна зробити висновок, що при збільшенні кута встановлення конвеєра в негативну сторону для одного і того самого обсягу вугілля, що транспортується, різниця в питомому електроспоживанні після конвеєра з регульованою і нерегульованою швидкістю руху конвеєрної стрічки стає більшою. При збільшенні кута встановлення конвеєра в негативну сторону величина питомої витрати електроенергії переходить в область негативних чисел, що некоректно описує сутність процесу. Тому такі режими роботи бремсбергових конвеєрів розглядати не будемо.

На рис. 3.16 зображено залежність питомої витрати електроенергії при  $\beta = -6^\circ$  від часового вантажопотоку для трьох типів конвеєрів.

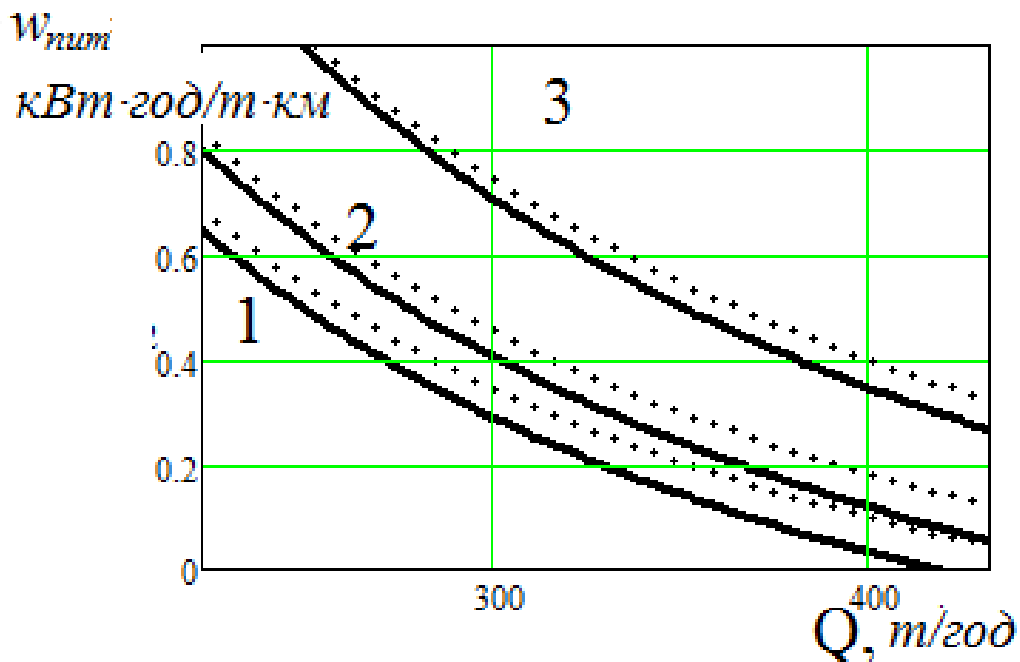


Рис. 3.16. Графіки залежності питомої витрати електроенергії від часового вантажопотоку для трьох типів конвеєрів: 2ЛТП80КСП (1), 2ЛТП1000КСП (2), 1Л120 (3) при регульованій (суцільні лінії) та нерегульованій (пунктирні лінії) швидкості руху стрічки попереднього конвеєра

Аналізуючи залежності, наведені на рис. 3.16, робимо висновок, що найбільше зниження питомої витрати електроенергії бремсбергового конвеєра при проходженні вантажу через конвеєр з регульованою швидкістю руху стрічки спостерігається на конвеєрі з меншою вагою рухомих його частин.

У п. 2.4 обґрунтовано вплив параметра  $n$  (2.38) на величину електроспоживання бремсбергового конвеєра. Вплив регулювання швидкості руху стрічки конвеєра, встановленого перед бремсберговим, на питому витрату електроенергії цього конвеєра знижується при збільшенні параметра  $n$  початкового вантажопотоку (рис. 3.17).

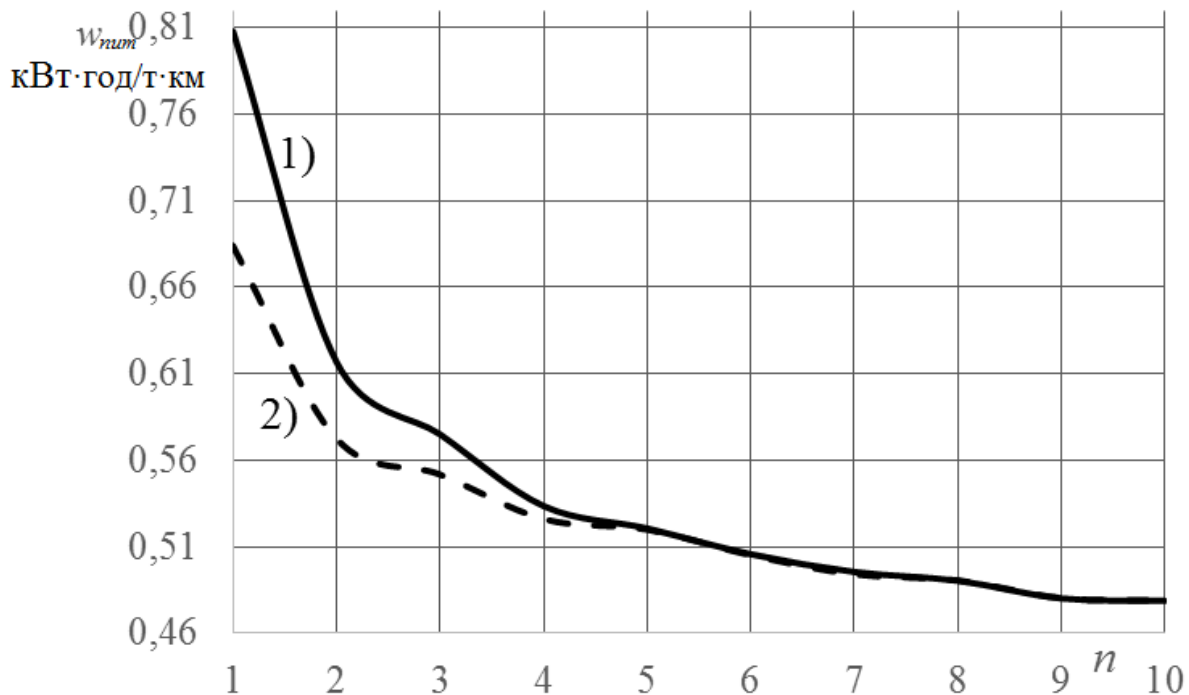


Рис 3.17. Графік залежності питомої витрати електроенергії бремсбергового конвеєра від параметра  $n$  при надходженні вугілля безпосередньо з очисного вибою (1) та з конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки (2)

Якщо наявні вантажопотоки з однаковими параметрами ( $T_n = 4$  хв і  $T_0 = 6$  хв, а математичне сподівання під час надходження вантажу становить 3,7 т/хв), то мінімально питома електроспоживання бремсбергового конвеєра з ймовірністю 90 % досягається при злитті більше 4-х вантажопотоків. При зміні ймовірнісних характеристик вантажопотоків регулюванням швидкості руху стрічки конвеєрів, встановлених до бремсбергового, для досягнення мінімального питомого електроспоживання потрібно лише підсумовування 2-х вантажопотоків.

У табл. 3.1 співставлено результати зміни часу відсутності сумарного вантажопотоку на приймальному конвеєрі, якщо вугілля надходить з конвеєрів з регульованою і не регульованою швидкістю руху стрічки.

Таблиця 3.1

**Середній час відсутності вантажу на збірному  
конвеєрі при надходженні  $k$  вантажопотоків**

Умови режимів роботи конвеєрів при надходженні вантажу на збірний конвеєр	Час відсутності сумарного вантажопотоку на збірному конвеєрі, хв, при кількості вантажопотоків $k$			
	1	2	3	4
З нерегульованою швидкістю руху стрічки	6	3,6	2,16	0,13
З регульованою швидкістю руху стрічки	2,3	0,5	0,1	0,03

Як бачимо з табл. 3.1, підсумовування вантажопотоків, що надходять з конвеєрів з регульованою швидкістю руху стрічки, на збірний конвеєр зменшує математичне сподівання часу відсутності надходження в більшій мірі, ніж з нерегульованою швидкістю, і залежить від  $k$  вантажопотоків, що надходять.

Розглянемо електроспоживання конвеєра з параметрами, узятими з рис. 2.8, при значеннях часу відсутності вантажопотоку, наведених у таблиці 3.1. Результати розрахунку питомого електроспоживання з урахуванням швидкості збірного бремсбергового конвеєра, пропорційні кількості вантажопотоків, наведені в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

**Питома витрата електроенергії бремсбергового  
конвеєра при надходженні  $k$  вантажопотоків**

Умови режимів роботи конвеєрів при надходженні вантажу на збірний конвеєр	Питома витрата електроенергії бремсбергового конвеєра, кВт·год/т·км, при кількості вантажопотоків $k$			
	1	2	3	4
З нерегульованою швидкістю руху стрічки	0,8	0,69	0,61	0,58
З регульованою швидкістю руху стрічки	0,74	0,536	0,527	0,522

Як бачимо з табл. 3.2, розрахункові показники питомого електроспоживання виявилися досить низькими в порівнянні з отриманими в роботі [1], оскільки розрахунок, виконаний для бремсбергового конвеєра, в якому більше завантаження відповідає меншій питомій витраті електроенергії. Аналізуючи наведені в табл. 3.2 значення, можна стверджувати, що питома електроспоживання

бремсбергового конвеєра з імовірністю 90 % буде мінімальним при  $k=2$  після проходження вантажопотоками конвеєрів з регульованою швидкістю руху стрічки. Питоме електроспоживання при абсолютно рівномірно прийнятому для розрахунків вантажопотоці для розглянутого бремсбергового конвеєра складе 0,49 кВт·год/т·км (розраховане відповідно за залежністю (2.41)). Не слід вважати це число мінімально можливим значенням електроспоживання для даного конвеєра (див. п. 2.1.) Для бремсбергового конвеєра можливий режим рекуперації, і він є найбільш раціональним.

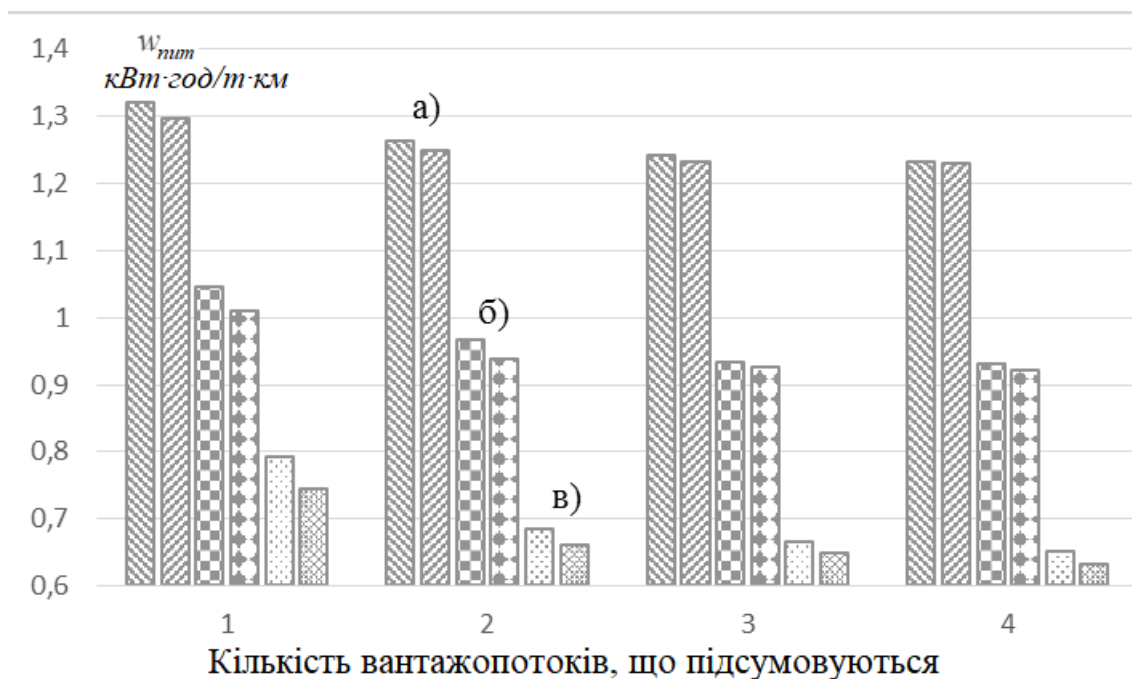


Рис. 3.18. Діаграми питомої витрати електроенергії від кількості підсумовуваних вантажопотоків на конвеєрі 2ЛТП1000КСП з кутом встановлення  $\beta = -6^\circ$  та значеннями інтенсивності кожного вантажопотоку: 260 т/год (а); 400 т/ год (б) і 620 т/ год (в)

Також на рис. 3.18 наведені стовпчики з подібною штриховкою для режиму нерегулювання/регулювання швидкості руху стрічки конвеєрів до бремсбергового.

При транспортуванні вантажу конвеєром з нульовим або позитивним кутом установлення залежність його електроспоживання від маси вантажу на ньому має вигляд, близький до прямої, та не має зламу, характерного для залежності електроспоживання бремсбергового конвеєра (див. рис. 2.10). Тому зміна динаміки вантажу, що надходить на такий конвеєр, при збереженні змінного (добового) обсягу перевезеного вугілля не впливає на витрату електроенергії.



### **3.3. Визначення місць встановлення перетворювачів частоти в шахтній транспортній мережі**

При використанні засобів підвищення енергоефективності на шахтному магістральному конвеєрному транспорті виникає задача оптимального розподілу перетворювачів частоти для регулювання швидкості руху конвеєрних стрічок при обмеженій кількості фінансових ресурсів. У першому розділі було проаналізовано виробників, які виготовляють вибухозахищені перетворювачі частоти для шахтних магістральних конвеєрів, та встановлено, що на напругу 660 В, що використовується в умовах шахт ПрАТ "ДТЕК Павлоградвугілля", виробляються тільки перетворювачі частоти типу ПЧВ-К У5. Вони виготовляються УкрНДІВЕ на потужність до 500 кВт (132 кВт, 160 кВт, 200 кВт, 315 кВт, 400 кВт, 500 кВт) [40]. У результаті досліджень [12] встановлено, що зазначена потужність задовольняє усі конвеєри згідно з потужностями їх приводів. Для придбання перетворювачів частоти напруги живлення необхідно:

- 1) встановити доцільність застосування перетворювачів частоти для кожного конвеєра,
- 2) визначити умови регулювання швидкості руху стрічки при обмежених фінансових ресурсах,
- 3) рекомендувати придбання певної кількості перетворювачів.

Для визначення місця встановлення засобів регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки за критерієм мінімального електроспоживання всієї системи шахтного транспорту використаний деревовидний граф (рис. 1.1). Для цього застосовуємо метод без ітерацій. Приймаємо, що в наявності є  $x$  перетворювачів частоти та  $k$  конвеєрів.

Підвищення енергоефективності відбувається при регулюванні швидкості руху конвеєрної стрічки на всіх недовантажених конвеєрах. Тому при достатньому обсязі фінансових ресурсів регулювання швидкості руху стрічки доцільно здійснювати на всіх недовантажених конвеєрах.

Якщо перетворювачів частоти (або матеріальних ресурсів на їх придбання) – обмежена кількість, то діємо за таким алгоритмом для наближеного розв'язання задачі їх розміщення:

1. Задається масив з  $x$  перетворювачів частоти та  $k$  конвеєрів. Для кожного конвеєра визначаються поля для введення встановлювальних характеристик (номінальна потужність).
2. За алгоритмом (п. 3.1, рис. 3.4) розраховуються статистичні характеристики вантажопотоків у вузлах системи конвеєрного транспорту.
3. Визначаються резерви зниження питомого електроспоживання кожного конвеєра (відповідно до п. 2.1).
4. Визначається фактичне питоме електроспоживання без регулювання швидкості руху стрічки за залежностями (2.40), (3.41).
5. Встановлюються перетворювачі частоти на приводи конвеєрів з найбільшою різницею між фактичним та мінімально можливим питомим електроспоживанням. Визначається енергоефективність всієї системи транспорту після встановлення перетворювачів.
6. Встановлюються перетворювачі частоти на лінії, що складається з 2 – 3 конвеєрів та має найбільший резерв енергоефективності, починаючи з коренів графа.
7. Визначається зростання енергоефективності від установаження перетворювачів частоти на кожному конвеєрі або в їх ланцюгу. Встановлюються перетворювачі частоти в місця найбільшого зростання енергоефективності. Визначається підвищення енергоефективності всієї системи магістрального конвеєрного транспорту та вибирається найкращий варіант за критерієм мінімуму питомого електроспоживання.

Визначимо місце розміщення перетворювачів частоти з метою мінімізації електроспоживання системи магістрального конвеєрного транспорту вугільної шахти. Задача відноситься до класу екстремальних та вирішується за допомогою методів лінійного програмування, найбільш прийнятним з яких є симплексний. Сформуємо початкові умови.

Задаємо дійсні множини електроспоживання конвеєрів  $W_{i,j}$ , вантажопотоків, що виходять з очисних вибоїв  $Q_{i,j}$ , бінарну множину розміщення засобів підвищення енергоефективності  $X_{i,j}$ , причому

$$\sum_i \sum_j X_{i,j} = const < i \cdot j; X_{i,j} = \{1; 0\}. \quad (3.15)$$

Необхідно визначити  $X_{i,j}$ , при якому

$$\sum_i \sum_j W_{i,j} \rightarrow \min. \quad (3.16)$$

Потік вугілля, що надходить на конвеєр,

$$Q_{i,j} = \begin{cases} \sum_m Q_{i,j-1}, & \text{якщо } X_{i,j} = 0; \\ f_1\left(Q_{i,j}, \sum_m Q_{i,j-1}\right), & \text{якщо } X_{i,j} = 1. \end{cases} \quad (3.17)$$

Електроспоживання конвеєра

$$W_{i,j} = \begin{cases} f_2(Q_{i,j}), & \text{якщо } X_{i,j} = 0; \\ f_3\left(Q_{i,j}, \sum_m Q_{i,j-1}\right), & \text{якщо } X_{i,j} = 1. \end{cases} \quad (3.18)$$

Залежності  $f_1\left(Q_{i,j}, \sum_m Q_{i,j-1}\right)$  можна описати рівняннями (3.6) – (3.9),  $f_2(Q_{i,j})$  – (2.32) – (2.36),  $f_3\left(Q_{i,j}, \sum_m Q_{i,j-1}\right)$  – (3.10) – (3.14).

Задачу розв'язуємо симплексним методом [80]. Ідея симплексного методу (методу послідовного покращення) полягає в тому, що, починаючи з деякого вихідного опорного розв'язування, здійснюється послідовно спрямоване переміщення по опорним розв'язуванням завдачі до оптимального. Симплекс-метод є універсальним, оскільки дозволяє розв'язувати практично будь-які задачі лінійного програмування, задані в канонічному вигляді. Значення цільової функції (3.16) при такому переміщенні для задач на максимум не убуває. Оскільки число опорних розв'язувань кінцеве, то через кінцеве число кроку отримаємо оптимальний опорний розв'язок.

Знаходимо вихідний опорний розв'язок та перевіряємо його на оптимальність. Для цього заповнюємо симплексну табл. 3.3. Всі рядки таблиці 1-го кроку, за винятком рядка  $\Delta_j$  (індексний рядок), заповнюємо за даними системи обмежень та цільової функції.

Таблиця симплекс-методу

$c_i$	Базисна змінна	$c_1$	$c_2$	...	$c_m$	$c_{m+1}$	...	$c_n$	$L(\bar{x})$
		$x_1$	$x_2$	...	$x_m$	$x_{m+1}$	...	$x_n$	$b_1$
$c_1$	$x_1$	1	0	...	0	$h_{1,m+1}$	...	$a_{1n}$	$f_1$
$c_2$	$x_2$	0	1	...	0	$h_{2,m+1}$	...	$a_{2n}$	$f_2$
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
$c_m$	$x_m$	0	0	...	1	$h_{m,m+1}$	...	$a_{mn}$	$f_m$
$\Delta_j$		0	0	...	0	$\Delta_{m+1}$	...	$\Delta_n$	$L(\bar{x})$

Індексний рядок  $\Delta_j$  для змінних знаходимо за формулою

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^m c_j h_{i,j} - c_j, \quad j = \overline{1, n}, \quad (3.19)$$

а для вільного члена як

$$\Delta_j = \sum_{i=1}^m c_j f_i. \quad (3.20)$$

Можливі такі випадки при знаходженні максимуму:

- якщо всі оцінки  $\Delta_j \geq 0$ , то знайдений розв'язок оптимальний;
- якщо хоча б одна оцінка  $\Delta_j < 0$ , але при відповідній змінній  $x_j$  немає жодного позитивного коефіцієнта, то процес розв'язання задачі припиняється, оскільки  $L(\bar{x}) \rightarrow \infty$ , тобто цільова функція не обмежена в області припустимих розв'язувань;
- якщо хоча б одна оцінка буде негативною, а при відповідній змінній є хоча б один позитивний коефіцієнт, то потрібно перейти до іншого опорного розв'язку;
- якщо негативних оцінок в індексному рядку кілька, то в стовпець базисної змінної вводять ту змінну, якій відповідає найбільша за абсолютною величиною негативна оцінка.

Нехай одна оцінка  $\Delta_k < 0$  або найбільша за абсолютною величиною  $\Delta_k < 0$ , тоді  $k$ -й стовпець приймаємо як ключовий, а за ключовий рядок приймаємо той, якому відповідає мінімальне відношення вільних членів ( $b_i$ ) до позитивних коефіцієнтів  $k$ -го

стовпчика. Елемент, що знаходиться на перетині ключових рядка та стовпчика, називають ключовим.

Заповнюємо симплексну таблицю 2-го кроку:

- переписуємо ключовий рядок, поділивши його на ключовий елемент;
- заповнюємо базисні стовпці;
- решту коефіцієнтів таблиці знаходимо за правилом «прямокутника». Оцінки можна розраховувати за наведеними раніше формулами або за правилом «прямокутника». Отримуємо новий опорний розв'язок, який перевіряємо на оптимальність і так далі

Правило «прямокутника» полягає в такому. Нехай ключовим елементом попереднього кроку є елемент 1-го рядка  $(m + 1)$ -го стовбчика  $h_{1,m+1}$ . Тоді елемент  $i$ -ї строки  $(m + 2)$ -го стовбця наступного кроку, який позначимо  $h_{i,m+2}$ , за правилом «прямокутника» визначається так:

$$h'_{i,m+2} = \frac{(h_{1,m+1} \cdot h_{i,m+2} - h_{i,m+1} \cdot h_{1,m+2})}{h_{1,m+1}}, \quad (3.21)$$

де  $h_{i,m+2}$ ,  $h_{i,m+1}$ ,  $h_{1,m+1}$  – елементи попереднього кроку.

Вихідні умови та результати, отримані при розв'язанні задачі для системи конвеєрного транспорту шахти "Павлоградська" симплекс-методом, такі.

Кількість очисних вибоїв  $i = 4$ ; найбільша кількість поспіль розміщених конвеєрів  $j = 9$ . Кількість перетворювачів частоти, які необхідно встановити,  $\sum_i \sum_j X_{i,j} = 7$ . Розрахунок здійснюємо для

середньозмінних значень витрати електроенергії, використовуючи співвідношення (3.19) – (3.21) та табл. 3.3.

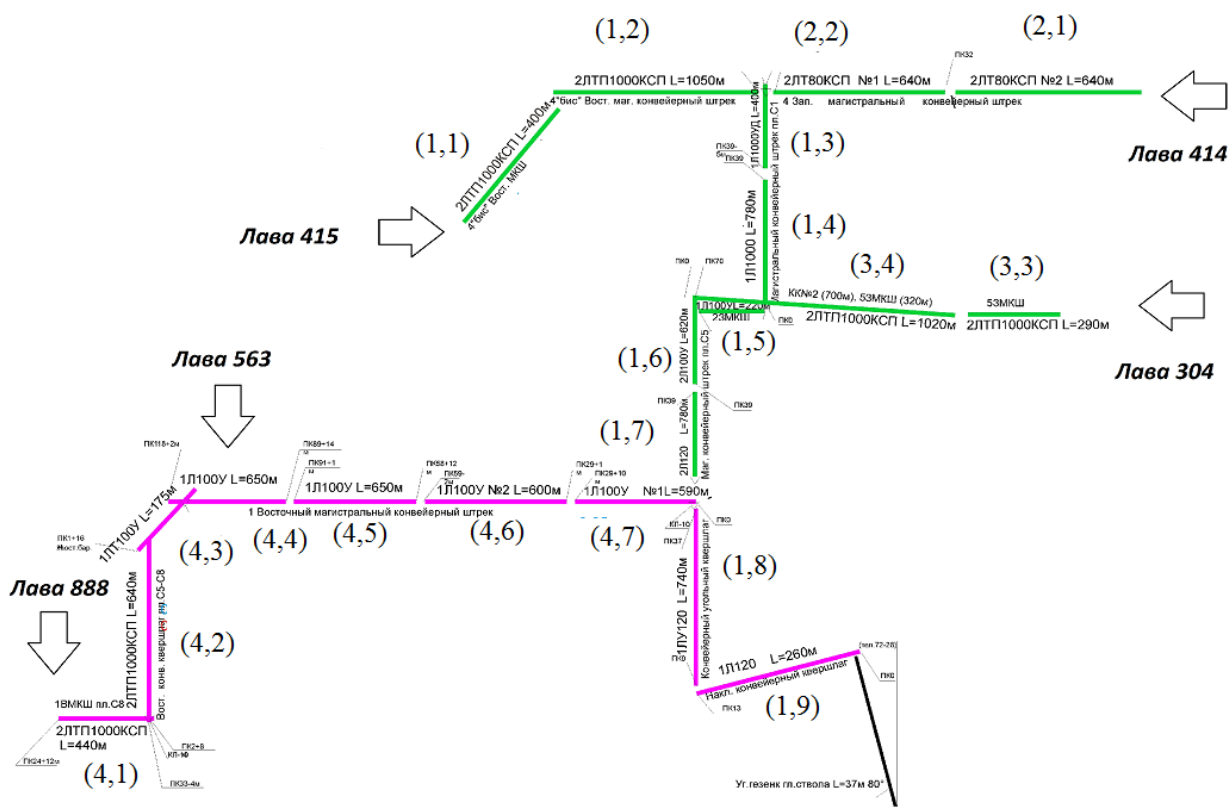


Рис. 3.19. Розрахункова схема магістральних конвеєрів шахти "Павлоградська" для визначення місць установаження перетворювачів частоти

У результаті розрахунків отримуємо бінарну матрицю розміщення перетворювачів частоти для магістральних конвеєрів:

$$X_{i,j} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Тоді витрата електроенергії магістральних конвеєрів шахти "Павлоградська" буде становити:

$$\sum_i \sum_j W_{i,j} = 9720,37 \text{ кВт}\cdot\text{ч};$$

$$W_{i,j} = \begin{pmatrix} 293,02 & 204,82 & 412,29 & 748,21 & 253,17 & 494,25 & 687,92 & 1832,51 & 1071,24 \\ 151,91 & 133,68 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 435,77 & 148,42 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 126,24 & 434,04 & 131,72 & 281,82 & 659,93 & 614,48 & 604,93 & 0 & 0 \end{pmatrix}.$$

Отриманий результат передбачає встановлення перетворювачів частоти до приводів магістральних конвеєрів шахти "Павлоградська" №1 та №2 Західного магістрального конвеєрного штреку, №1 ВМКШ (Східного магістрального конвеєрного штреку), №1 та №2 53МКШ (Західного магістрального конвеєрного штреку), а також 1 МКШ пл. С8 та №4 1 ВМКШ.

Таким чином, установлення регульованого приводу в лінії конвеєрів дає додатковий ефект в частині зниження витрат електроенергії за рахунок роботи кожного наступного конвеєра в лінії більш тривалий час на мінімальній швидкості. При зменшенні довжини конвеєрів у лінії такий ефект нівелюється. Додаткове зниження витрат електроенергії досягає 4–5 % за рахунок більш повного використання резерву енергоефективності в лінії, що складається з декількох конвеєрів з регульованою швидкістю руху стрічки. Таке регулювання забезпечує додатковий ефект зниження витрати електроенергії на збірних бремсбергових конвеєрах, на яких не встановлені перетворювачі частоти, що є наслідком зниження динаміки вантажопотоків. Зниження витрати електроенергії при цьому на бремсберговому конвеєрі досягає 20 %. Додаткове зниження електроспоживання всієї системи магістрального транспорту може досягти 9 %, проте точне значення індивідуальне для кожної шахти і залежить від кількості конвеєрів, їх розташування, кутів установлення і динаміки вантажопотоків.

Розроблений алгоритм оцінки ефективності впровадження ЧРП дозволяє визначити найбільш проблемні ділянки транспортного ланцюга, на яких у першу чергу потрібно встановлення засобів підвищення енергоефективності, що особливо актуально в умовах обмежених матеріальних ресурсів. Програмна реалізація запропонованих алгоритмів та аналітичних моделей дозволяє в реальному часі здійснювати контроль енергоефективності транспортних ліній, які включають конвеєрні установки з регульованим приводом.

## 4. ІМІТАЦІЙНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ РОБОТИ КОНВЕЄРНИХ ЛІНІЙ

### 4.1. Алгоритми визначення енергоефективності магістрального конвеєрного транспорту

Визначення енергоефективності магістрального конвеєрного транспорту вугільних шахт з асинхронним регульованим приводом вимагає експериментального підтвердження. Однак через недосконалість існуючих засобів обліку витрати електроенергії виконати експеримент не представляється можливим. Тому існує необхідність у розробленні алгоритмів і імітаційних моделей для визначення електроспоживання конвеєрного транспорту з регульованою і нерегульованою швидкістю руху конвеєрної стрічки з урахуванням динаміки вантажопотоків.

Для визначення енергоефективності режимів роботи конвеєрів у складних розгалужених транспортних системах розроблені алгоритми, які дозволяють моделювати їх електроспоживання, а також динаміку потоків вугілля, видобутого з очисних вибоїв.

Потік вугілля, видобутого з очисного вибою,  $Q(t)$  описується як добуток двох взаємно некорельованих величин [18]: безперервної  $Q'(t)$  та дискретної  $Y_Q(t)$ , тобто

$$Q(t) = Q'(t) \cdot Y_Q(t). \quad (4.1)$$

Кожна складова у виразі (4.1) являє собою часовий ряд зі своїми характеристиками. Безперервна складова вантажопотоку апроксимується випадковою функцією з розподілом миттєвих значень продуктивності за законом, близьким до нормального [18]. Процес  $Y_Q(t)$  описується узагальненою функцією, яка являє собою нескінченну суму функцій Хевісайда, взятих по чергово з позитивним і негативним знаками. У роботі [19] автор розглядає процес  $Y_Q(t)$  як «потік готовності» технологічного ланцюга.

Алгоритм знаходження значень дискретної компоненти надходження вугілля, детально описаний в роботі [18]. Відзначимо, що для його виконання, крім значень змінних вихідної реалізації, необхідні додаткові змінні часу наявності  $t_n$  та відсутності



вантажопотоку  $t_0$ . Також при кожній реалізації узагальнена функція  $Y(t)$  (для зручності тут та далі це позначення використовується замість  $Y_Q(t)$ ) є залежною не тільки від її попереднього значення  $Y(t-1)$  та складової, що флюктує  $Q(t)$ , але і від змінних, які на певному проміжку не випадково залежать від декількох попередніх значень. Випадковими будуть лише моменти переходів функції  $Y(t)$  з одного дискретного стану в інший. Тому був розроблений новий алгоритм знаходження дискретної компоненти.

Алгоритм, наведений на рис. 4.1, на відміну від описаного у роботі [18], дозволяє моделювати Марківський процес як процес без післядії: стан деякої системи в даний момент часу  $t_0$  однозначно визначає розподіл імовірностей майбутнього розвитку процесу при  $t_0 < t$ , а інформація про минулу поведінку процесу до моменту  $t_0$  не впливає на цей розподіл. Тому приймається, що події, які відбулися до моменту  $t_0$ , ніяк не впливають на хід перебігу подальшого процесу [81].

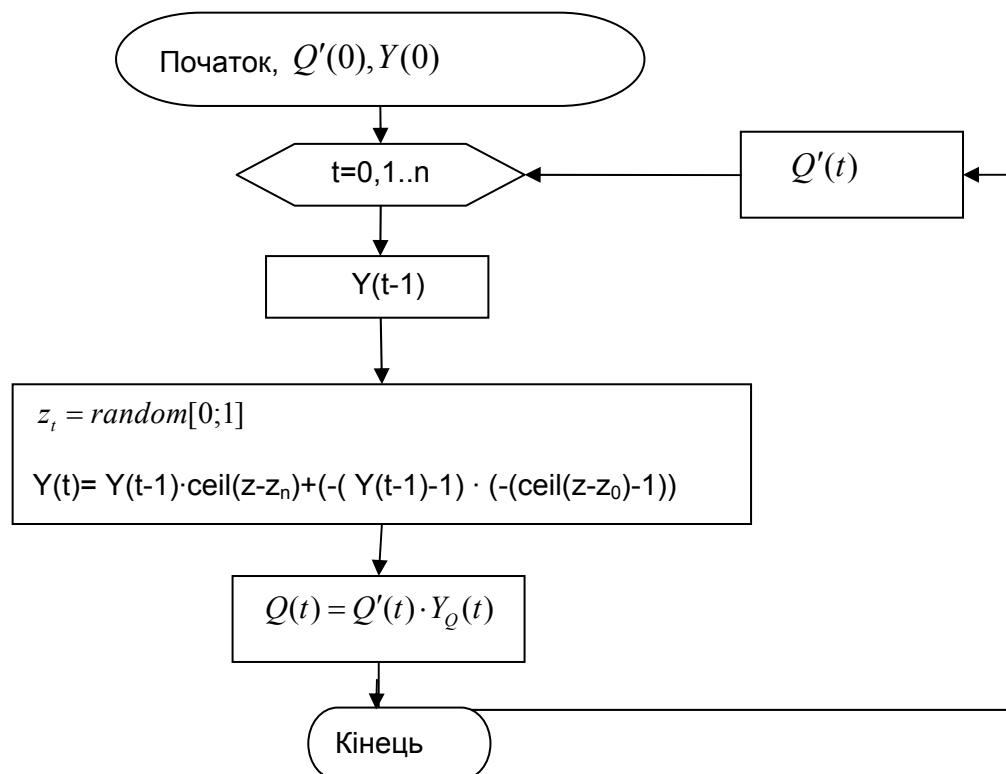


Рис. 4.1. Алгоритм обчислення значень дискретної складової випадкового процесу  $Y(t)$

В алгоритмі, що пропонується (рис. 4.1), використовується властивість лінійної функції  $y = -(x-1)$ :  $y=0$  при  $x=1$  та  $y=1$  при  $x=0$ , що дозволяє відійти від умовних конструкцій і не вводити додаткових змінних. Додаткові умовні конструкції ускладнюють моделі в

програмному пакеті MATLAB SIMULINK. Функція  $Y(t)$  в кожен момент часу може дорівнювати або першій частині суми  $Y(t-1) \cdot \text{ceil}(z-z_n)$ , або другій  $-(Y(t-1)-1) \cdot (-(\text{ceil}(z-z_0)-1))$ , оскільки множники  $Y(t-1)$  та  $-(Y(t-1)-1)$  приймають протилежні двійкові значення при однаковому значенні функції  $Y(t-1)$ . У першій частині суми множник  $\text{ceil}(z-z_n)$  дорівнює одиниці при  $z > z_n$ , що визначає ймовірність початку інтервалу відсутності вантажопотоку при  $z < z_n$ . Множник  $-(\text{ceil}(z-z_0)-1)$  у другій частині суми діє протилежно, визначаючи ймовірність початку інтервалу наявності вантажопотоку. Схема реалізації запропонованого алгоритму в програмному пакеті MATLAB SIMULINK наведена на рис. 4.2.

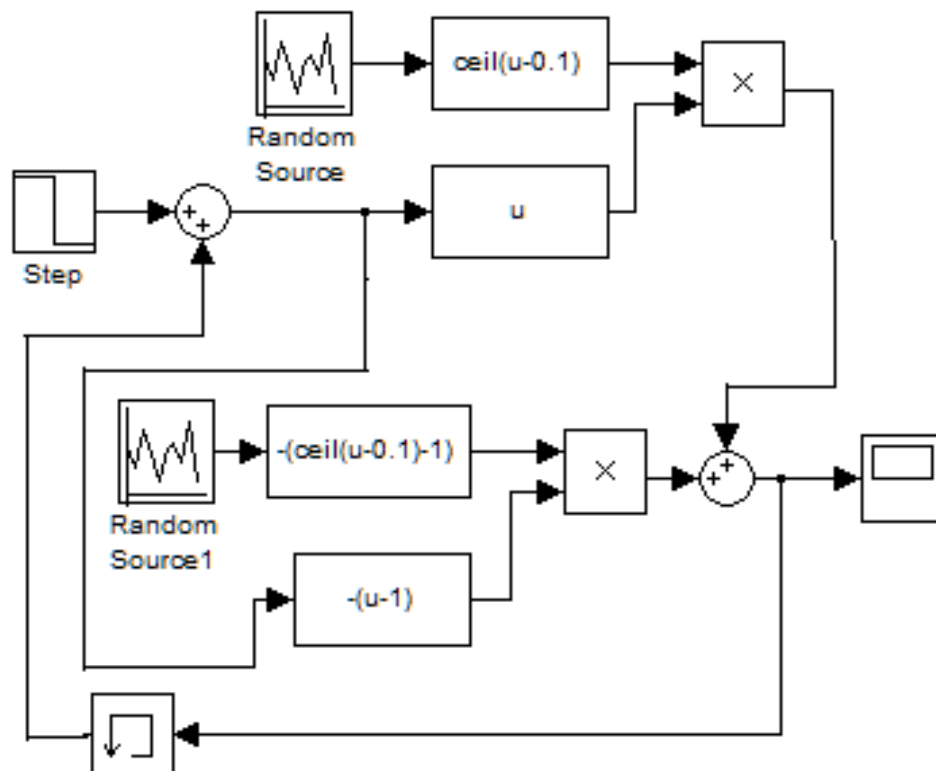




Рис. 4.2. Схема реалізації алгоритму в пакеті SIMULINK

Функція  $\text{ceil}$  (англ. *перекривати*) запозичена з мови програмного пакета MATLAB, яка означає округлення до найближчого більшого цілого. Константи  $z_n$  та  $z_0$  відповідають імовірностям процесу  $Y(t)$ , що дозволяє прийняти значення  $Y(t)=0$  при  $Y(t-1)=1$  та  $Y(t)=1$  при  $Y(t-1)=0$  відповідно, які згідно з роботою [12] обчислюються так:

$$z_n = p(\tau_n) = \lambda \exp[-\lambda \tau]; \quad (4.2)$$

$$z_0 = p(\tau_0) = \mu \exp[-\mu \tau], \quad (4.3)$$

де  $\tau$  – час автокореляції.

Блок  запам'ятовує значення попередньої реалізації. Блок  Step задає значення  $Y(0)=1$ , наступні значення на виході цього блока дорівнюють 0. Блок Random Source генерує рівномірно розподілені випадкові значення на інтервалі  $[0;1]$ . На рис. 4.3. розглянута одна з випадкових реалізацій процесу  $Y_Q(t)$  при заданих імовірностях: початку надходження вантажу при його відсутності  $z_n = p(\tau_n) = 0,1$  та початку відсутності вантажу при його надходженні  $z_0 = p(\tau_0) = 0,1$ .

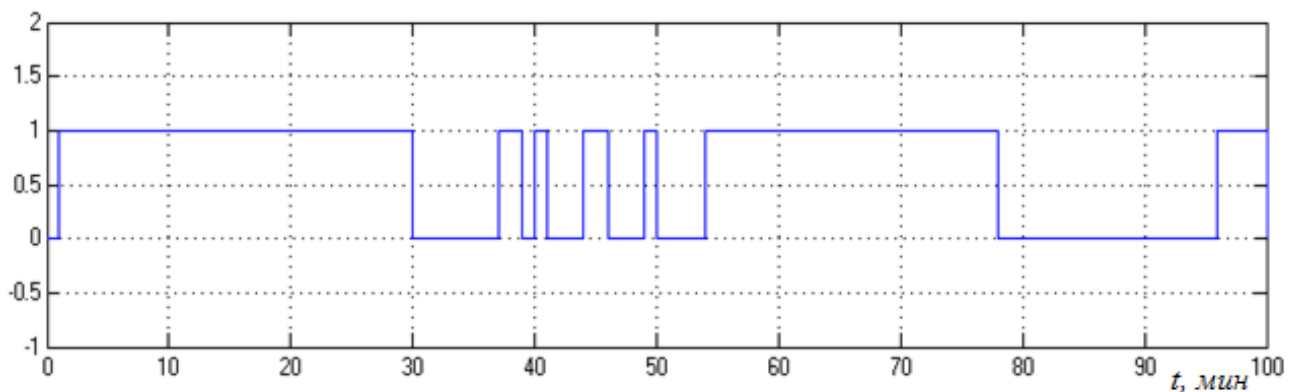


Рис. 4.3. Графік реалізації випадкового процесу  $Y_Q(t)$  для 100 однохвилинних значень

Алгоритм, наведений на рис. 4.1, є частиною повного алгоритму моделювання обсягу надходження вугілля з очисного вибою. На рис. 4.4 наведено повний алгоритм, що дозволяє визначити величину вугільного потоку, автокорельованого з інтервалом хвилина.

Даний алгоритм функціонує таким чином. Задаються величини: математичне сподівання вантажопотоку  $M$ , кг/мин, стандартне квадратичне відхилення вантажопотоку від середнього  $D$ , кг/мин, машинний час роботи очисного вибою  $K_m$ , вірогідності відсутності і наявності вантажопотоку  $z_n$  та  $z_0$ . При кожній ітерації визначається  $i$ -е значення вантажопотоку  $Q(i)$  шляхом підсумовування попереднього значення процесу  $Q(i-1)$  з флуктуаційною складовою  $F1$ , яка являє собою добуток випадкового нормального процесу на проміжку  $(0,1)$  із заданим квадратичним відхиленням  $D$ , помноженим на коефіцієнт впливу  $0,1 \cdot (2 - 0,1)$ . Далі знаходиться добуток дискретної і безперервної компонент.

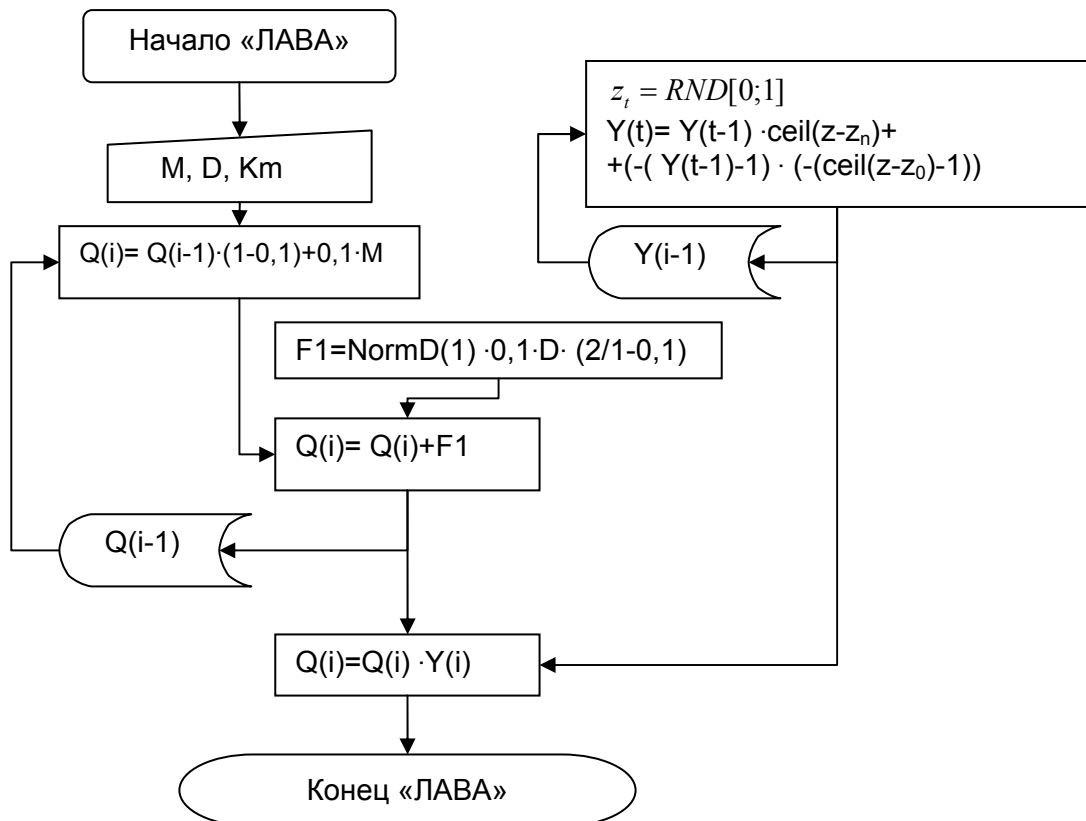


Рис. 4.4 Алгоритм моделювання хвилинних значень потоку гірської маси, видобутої з очисного вибою

Для моделювання режиму функціонування системи шахтного конвеєрного транспорту також необхідно розробити відповідні алгоритми опису роботи та електроспоживання одиничного конвеєра. Вихідними даними для розроблення алгоритму оцінки режимів роботи стрічкового конвеєра прийняті параметри його установаження, хвилинні значення вантажопотоку, отримані при реалізації алгоритму, наведеного на рис. 4.4. При цьому враховується наявність/відсутність засобів регулювання швидкості руху стрічки конвеєра, а також його максимальна хвилинна приймальна здатність. У результаті реалізації алгоритму отримуємо вихідний потік з конвеєра і його хвилинне електроспоживання.

На рис. 4.5 наведений алгоритм розрахунку хвилинних реалізацій вихідного вантажопотоку конвеєра і його електроспоживання за хвилинними значеннями вхідного вантажопотоку. Частина алгоритму, що дозволяє визначити витрату електроенергії, винесена окремо і наведена на рис. 4.6. Алгоритм моделювання конвеєра фактично реалізує змінну транспортну затримку, величина якої залежить від параметрів

вхідного вантажопотоку при регулюванні швидкості руху стрічки і не залежить за відсутності регулювання швидкості стрічки. Алгоритм транспортної затримки детально описаний в роботах [47, 82]. Підраховується різниця значень вантажопотоку до та після транспортної затримки, яка інтегрується за часом для визначення поточної маси вугілля на конвеєрі. Ця величина та відома погонна вага рухомих частин конвеєра задіяни в тяговому розрахунку конвеєра. З урахуванням поточної швидкості розраховується електроспоживання конвеєра за інтервал часу, який дорівнює хвилині. Коефіцієнт опору переміщенню рухомих частин конвеєра і вантажу, а також поправка на зосереджені опори враховуються константами  $\omega$ ,  $c'$ . При цьому модель враховує також зниження ККД приводу при переході конвеєра в рекуперативний режим роботи.

Алгоритми, наведені на рис. 4.4 – 4.6, є лінійними функціями зі зворотними зв'язками для можливості їх роботи в одному циклі моделювання системи шахтного транспорту з як завгодно великою кількістю ітерацій. За допомогою алгоритмів можливо виконати  $i$ -ту реалізацію процесу проходження гірської маси в точках транспортної мережі і розраховувати споживання електроенергії у часі.

Дані алгоритми розроблені для використання в програмному середовищі MATLAB SIMULINK, яке призначено для моделювання динамічних систем у часі.

Загальний зв'язок окремих блоків алгоритмів розглянутий на рис. 4.7 (для випадку надходження вантажу з одного очисного вибою на один магістральний конвеєр). У складній системі конвеєрного транспорту зв'язок між блоками здійснюється в залежності від топології самої системи магістрального конвеєрного транспорту.

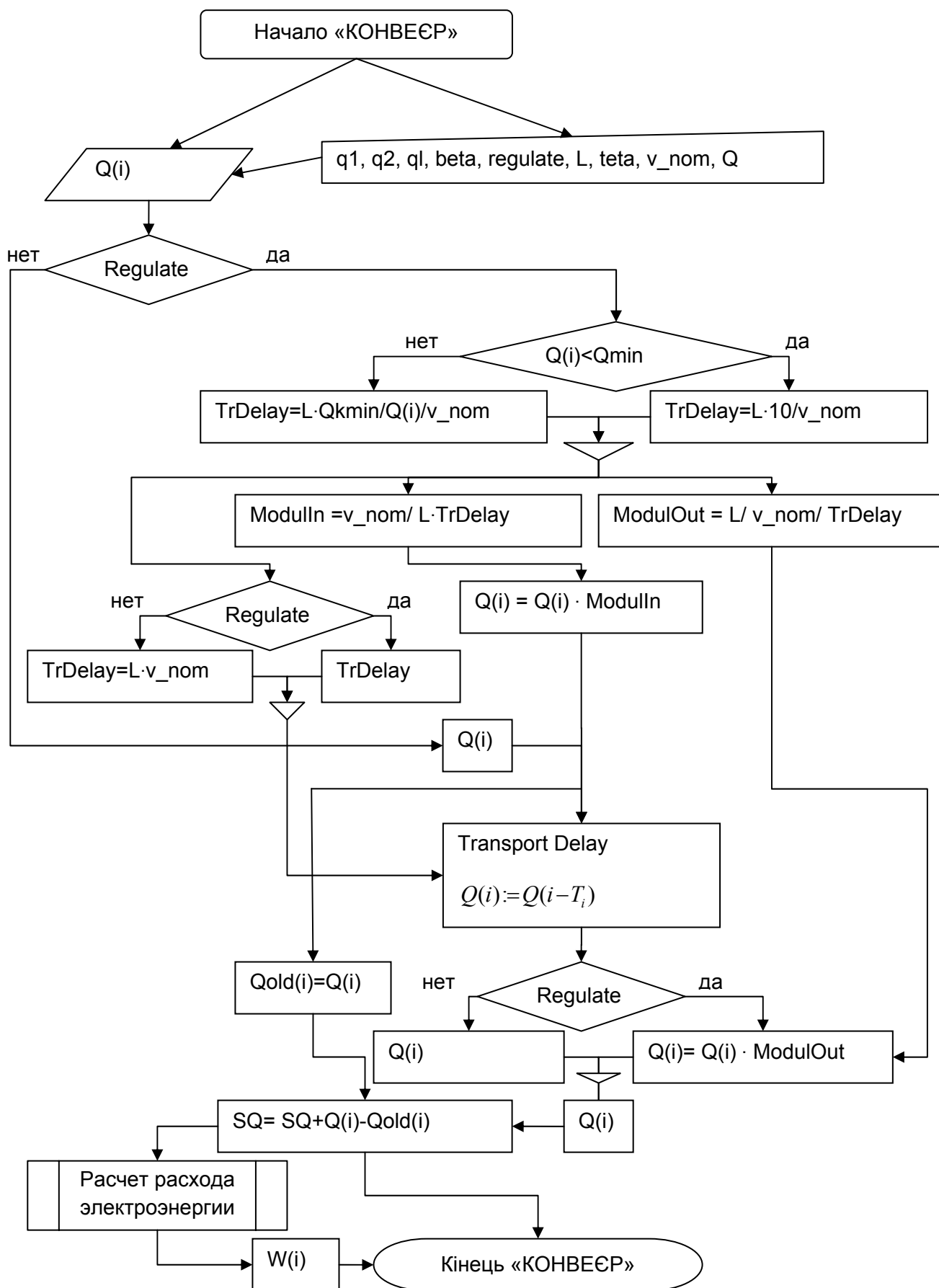


Рис. 4.5. Алгоритм розрахунку хвилинних реалізацій вихідного вантажопотоку конвеєра та електроспоживання

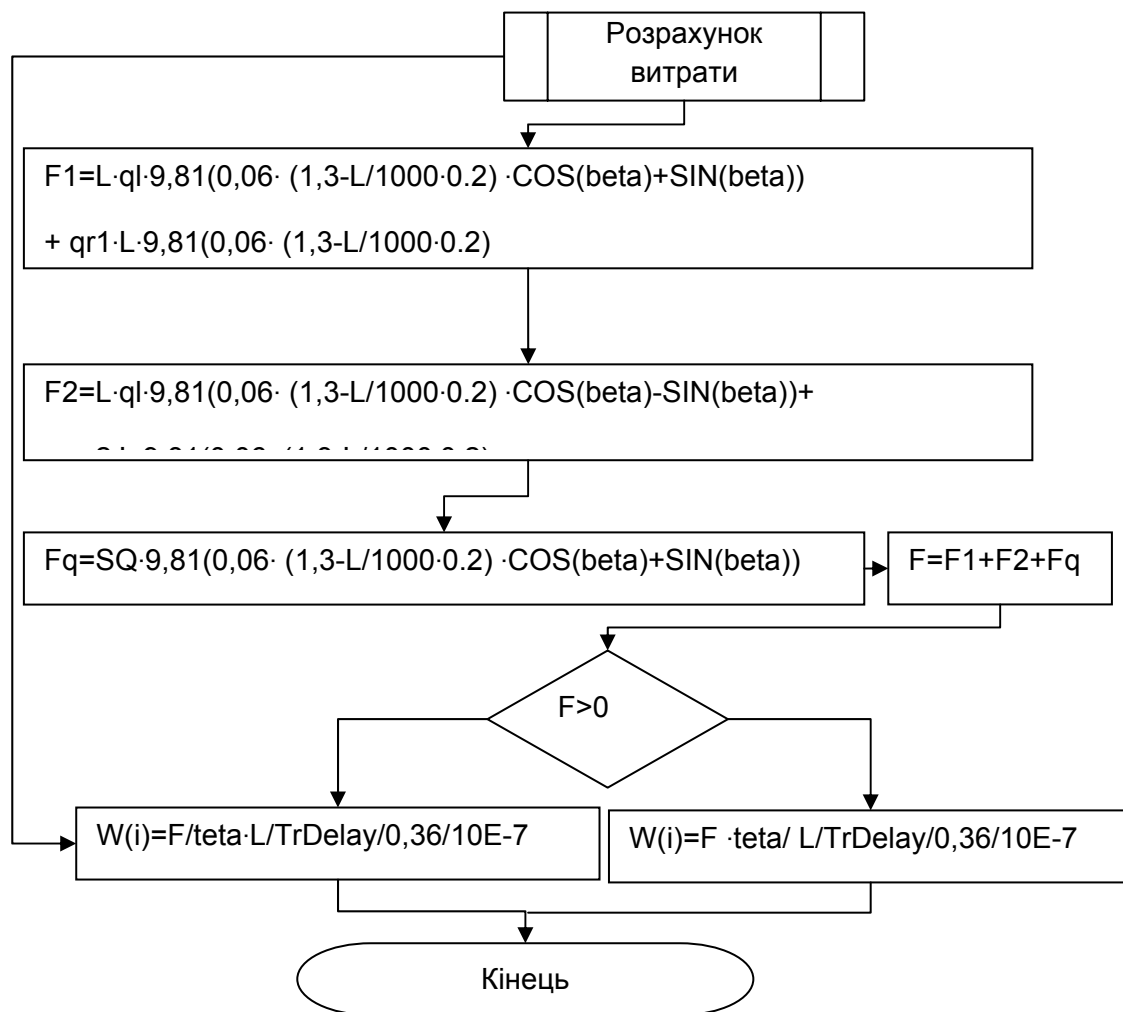


Рис. 4.6. Підалгоритм розрахунку споживання електроенергії конвеєром

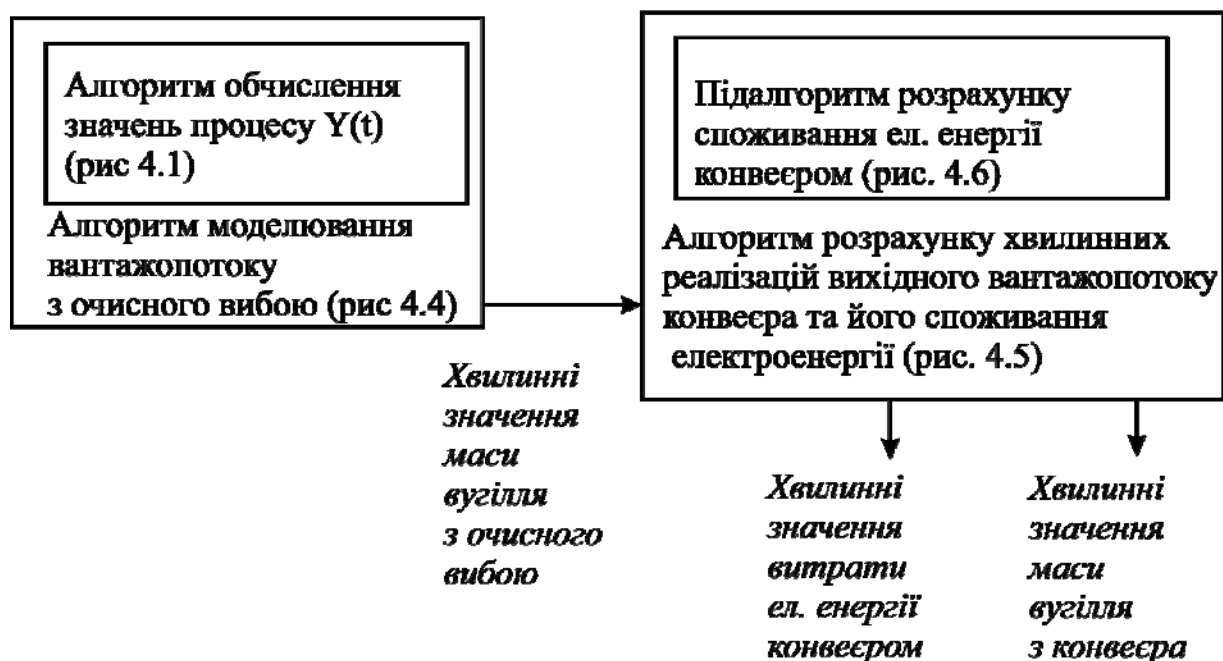


Рис. 4.7. Послідовність з'єднання блоків алгоритмів у загальній структурі моделювання

## **4.2. Програмна реалізація моделей визначення енергоефективності**

За наведеними на рис. 4.4 – 4.7 алгоритмам, розроблені імітаційні моделі блоків у середовищі MATLAB SIMULINK [83], які гнучкі до моделювання транспортних мереж будь-якої складності. Середовище дозволяє інкапсулювати параметри і розрахунок фізичних систем у візуально оформлені блоки, з'єднувати ці блоки, передаючи розрахункові значення у системи в систему. Стосовно до розв'язуваної задачі кожен блок характеризується набором параметрів для відповідності його реальному аналогу в транспортній мережі шахти. Блок «ЛАВА» має тільки вихідний порт для моделювання вихідного вантажопотоку. Блок «КОНВЕЄР» має вхідні і вихідні порти для вантажопотоків. Також блок «КОНВЕЄР» має вихідний порт для індикації спожитої електроенергії і порт для відстеження поточної маси вантажу на конвеєрі.

Блок «ЛАВА» характеризується такими внутрішніми параметрами (див. рис. 4.8):

- математичним сподіванням вантажопотоку на осі машинного часу, кг/хв;
- дисперсією вантажопотоку на осі машинного часу, кг/хв;
- коефіцієнтом машинного часу.

Блок «КОНВЕЄР» характеризується такими параметрами (див. рис. 4.9):

- можливість регулювання, "так" або "ні";
- маса нижніх роликів, кг/м;
- маса верхніх роликів, кг/м;
- маса стрічки, кг/м;
- паспортна продуктивність конвеєра при поточній швидкості руху стрічки, т/год;
- поточна швидкість руху стрічки, м/с (або максимальна в регульованому режимі);
- довжина конвеєра, м;
- кут установлення става конвеєра, град;
- ККД приводу.

У блоках використовуються готові елементи середовища MATLAB SIMULINK: Normal distribution – нормальний розподіл у діапазоні від 0 до 1; Uniform distribution – неперервний рівномірний



розподіл у діапазоні від 0 до 1; Step – стрибкоподібний імпульс; Multiply – скалярне множення величин; Sum – підсумовування величин; Function – задана користувачем складна математична функція; Const – стала величина; Memory – затримка вхідного сигналу на один часовий такт. Switch – аналог умовного оператора.

Рис. 4.8. Алгоритм моделювання потоку гірської маси, що надходить з очисного вибою, в середовищі SIMULINK

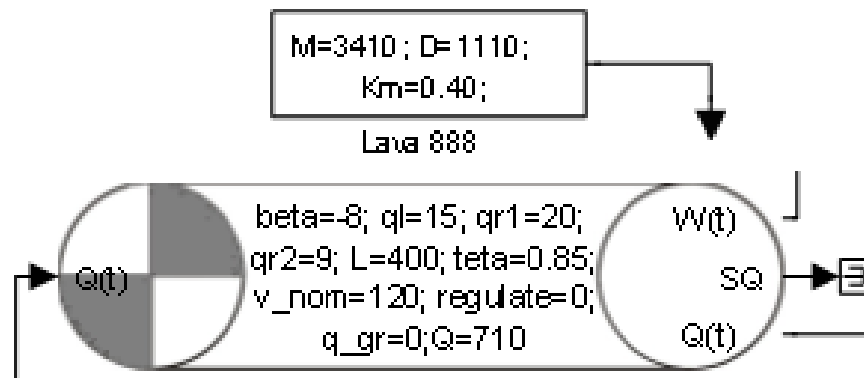


Рис. 4.9. Зовнішній вигляд блоків моделювання станів очисного вибою і конвеєра

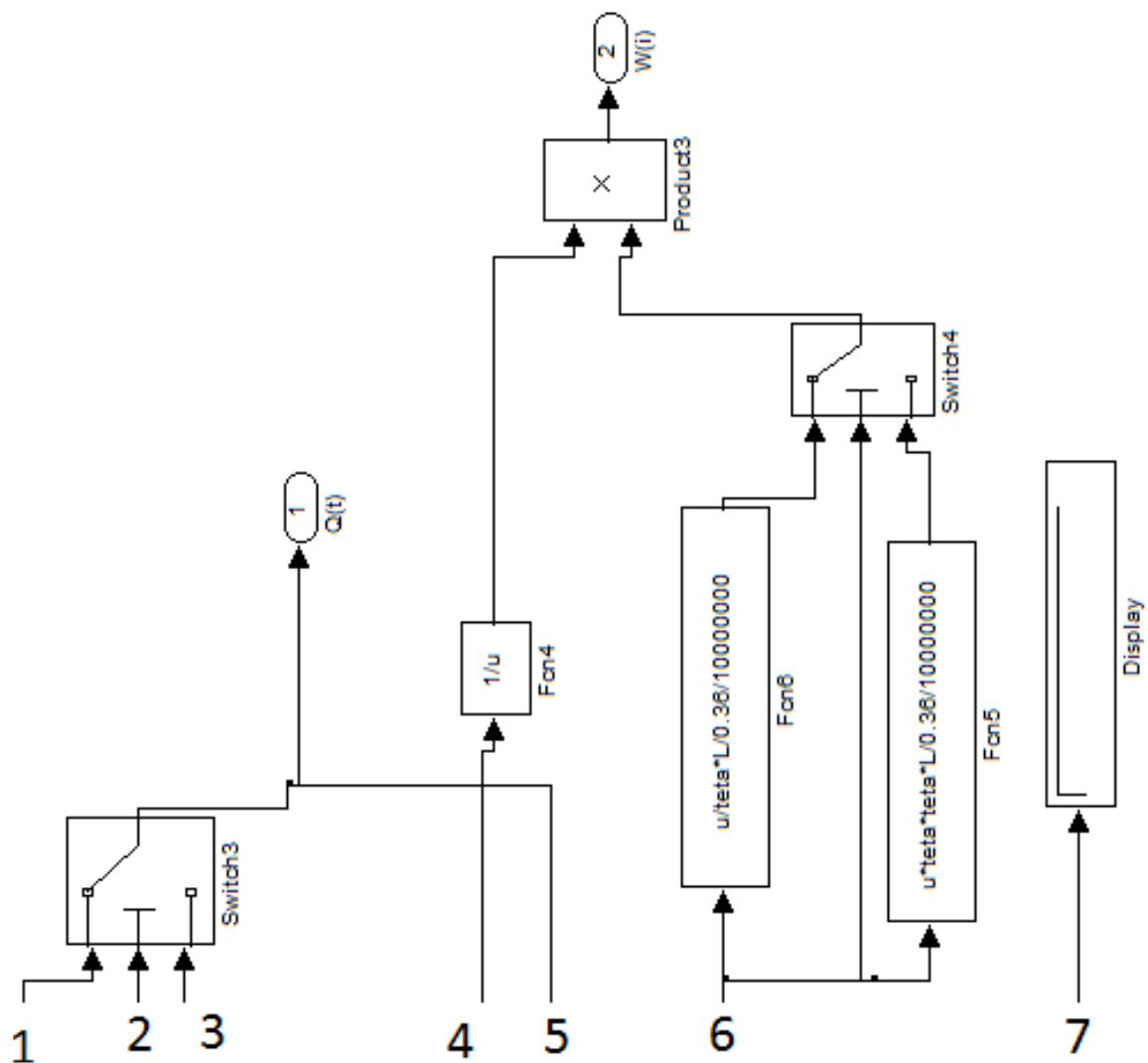


Рис. 4.10. Алгоритм розрахунку хвилинних значень вихідного вантажопотоку конвеєра і його електроспоживання в середовищі SIMULINK



Для моделювання системи шахтного конвеєрного транспорту необхідно з'єднати наведені на рис. 4.7 та 4.9 блоки виходячи з місця розташування і параметрів технологічних ланок. Для підтвердження алгоритмів (рис. 4.1, 4.4 – 4.7) на рис. 4.11 розглянута розрахунково-експериментальна імітаційна модель визначення режимів роботи системи конвеєрного транспорту для типової шахти "Павлоградська" ПрАТ "ДТЕК Павлоградвугілля", яка розроблена в програмному пакеті MATLAB SIMULINK [83].

Схема магістральних конвеєрних ліній шахти «Павлоградська» розглянута на рис. 1.1.: 4 «біс» східний і 4 західний магістральні конвеєрні штреки розташовані на горизонті 160 м та приймають вугільний потік від лав 415 і 414 відповідно. Вугілля з лави 415 видобувається за допомогою комбайна УКД 200/400. Для транспортування вугілля від лави в магістральному конвеєрному штреку розташовано два конвеєри 2ЛТП1000КСП довжиною 400 і 1050 м. На кожному з них встановлено по два привідних двигуна потужністю 110 кВт кожний. Швидкість руху конвеєрної стрічки 2 м/с, пропускна здатність 710 т/год. Конвеєри мають практично 4-кратний запас з продуктивної здатності. Це пов'язано з тим, що раніше ця транспортна гілка працювала на дві видобувних ділянки 413 і 403. Перший конвеєр у цій гілці довжиною 400 м, розташований під кутом падіння  $-8^{\circ}$ . Другий працює на горизонтальній ділянці.

Західний магістральний конвеєрний штрек №4 знаходиться на тому самому горизонті, але при спрямуванні руху вугілля з півночі на схід. Конвеєрна магістраль складається з конвеєрів типу 2ЛТ80КСП, кожний (два) довжиною 640 м. Швидкість руху стрічки 2,5 м/с, пропускна здатність 510 т/год. Вантажопотік формується від однієї лави 414. Конвеєри обладнані дводвигуновим приводом потужністю 55 кВт кожний. Обсяг вугілля обох лав підсумовується і надходить на транспортну магістраль пл. С1, яка складається з трьох конвеєрів: 1Л100У довжиною 220 м, 1Л1000 довжиною 780 м та 1Д100УД довжиною 400 м. Максимальну пропускну здатність цього ланцюга конвеєрів обмежує конвеєр 2Л100У пропускну здатністю 684 т/год.

Конвеєрний квершлаг № 2 і 53-й магістральний конвеєрний штрек приймають вугілля з лави 304 за допомогою видобувного комплексу типу «Ostroj». Він складається з двох конвеєрів ЛТП1000КСП довжиною 1020 та 290 м. На першому конвеєрі

встановлено два двигуни потужністю 132 кВт, кожний на другому два двигуни потужністю 110 кВт кожний. Комплекс «Ostroj» забезпечує пропускну здатність до 2500 т/добу.

Вантажопотоки магістрального конвеєрного штреку пл. С1 та конвеєрного квершлягу №2 об'єднуються на другому конвеєрі магістрального конвеєрного штреку пл. С5. Конвеєр типу 2Л100У довжиною 620 м обладнаний двома двигунами потужністю 110 кВт кожний. Перший в цій лінії конвеєр 2Л120 має довжину 780 м та обладнаний двома двигунами потужністю 250 кВт кожний. Особливістю цих конвеєрів є те, що використання в них двигунів з частотою обертання 1000 об/хв забезпечує швидкість руху стрічки 1,5 м/с.

Далі вугілля надходить на конвеєр 1ЛУ120 довжиною 740 м, розташований в конвеєрному вугільному квершлязі. На конвеєрі встановлено два двигуни потужністю 250 кВт кожний, що забезпечує пропускну здатність 1260 т/год. На цей самий конвеєр вивантажується вугілля з конвеєра 1Л100У №1 довжиною 590 м з 1-го східного магістрального конвеєрного штреку. Вивантаження відбувається через усереднювальний бункер об'ємом 7 м<sup>3</sup>.

Вантажопотік для 1-го східного магістрального конвеєрного штреку починає формуватися з лави 888. Вугілля в цій лаві видобувається комбайном УКД-800ДМ, транспортується 2ЛТП1000КСП довжиною 440 м 1ВКШ пл.С8 та далі надходить на конвеєр 2ЛТП1000КСП довжиною 640 м східного конвеєрного квершлягу пл. С5-С8. З цього конвеєра вугілля прямує на конвеєр 1ЛТ100У довжиною 175 м і далі через усереднюючий бункер – на конвеєр 1Л100У довжиною 650 м. На цей самий конвеєр вивантажується вугілля зі збірного конвеєра лави 563 і за допомогою чотирьох конвеєрів 1Л100У надходить на конвеєрний вугільний квершляг, потім на нахилений конвеєрний квершляг і далі у вугільний гезенк гол. стовбура висотою 37 м з кутом нахилу 8°.

Згідно з описаним та рис. 1.1, а також характеристиками конвеєрів, наведеними у табл. 4.1, скомпонована імітаційна модель (див. рис. 4.11).

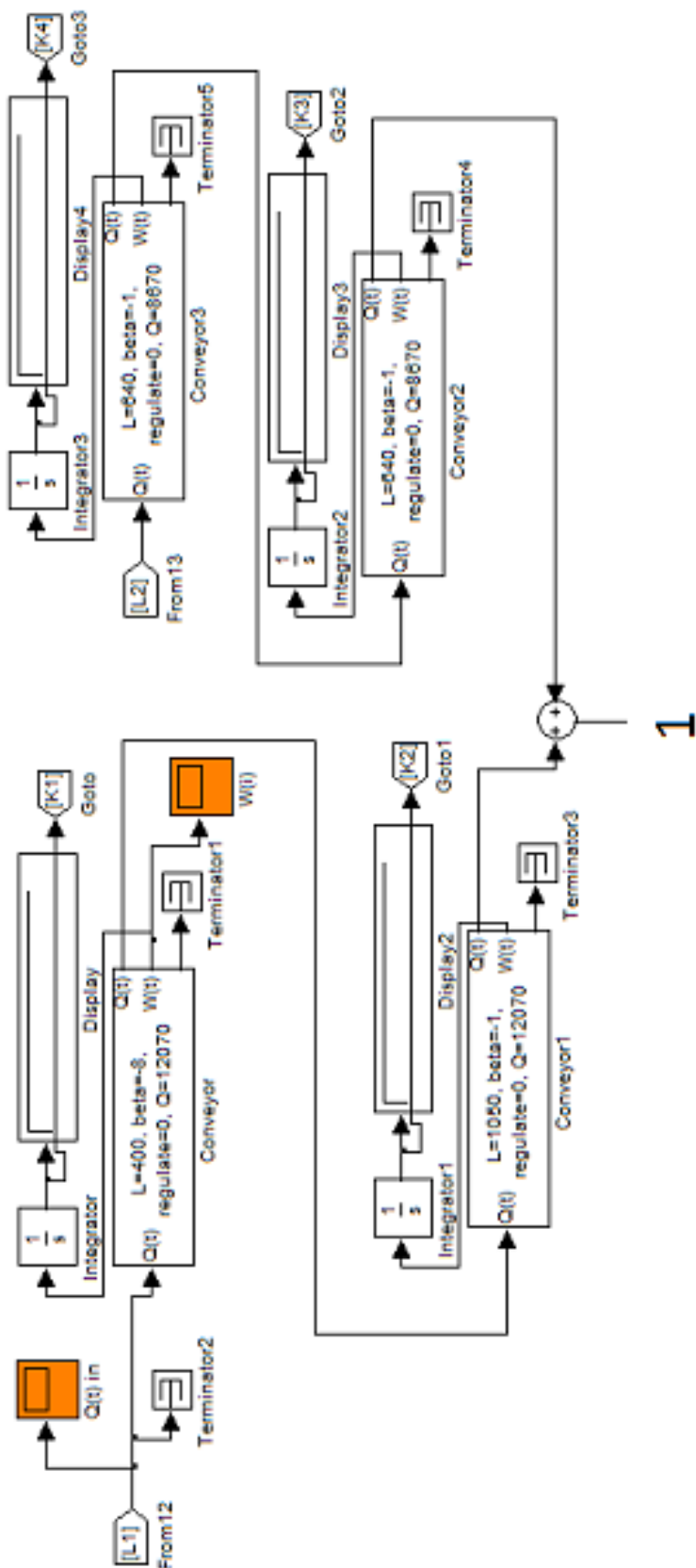


Рис. 4.1.1. Імітаційна модель магістрального конвеєрного транспорту

ш. "Павлоградська"

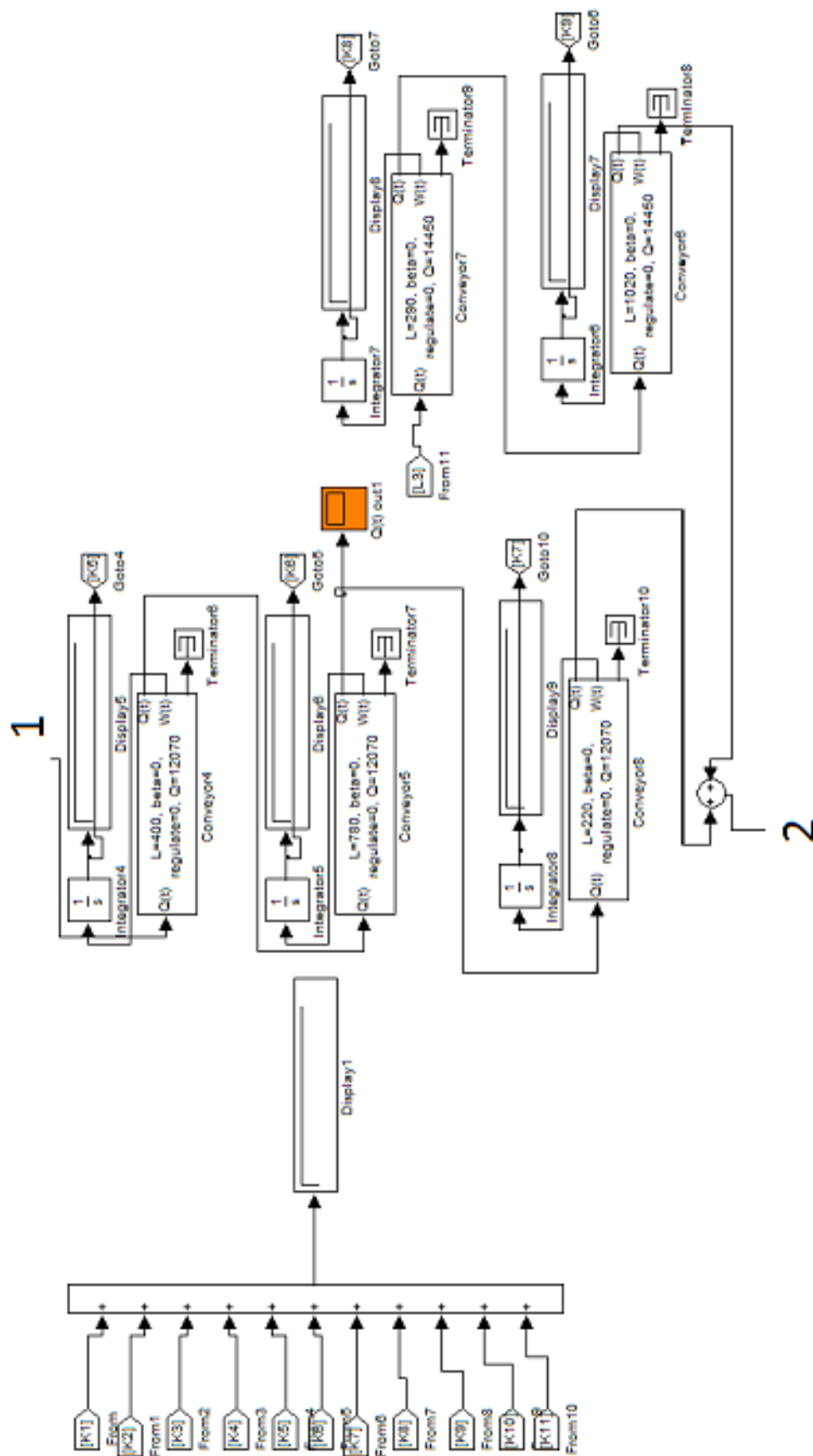


Рис. 4.1.1. Продолжения

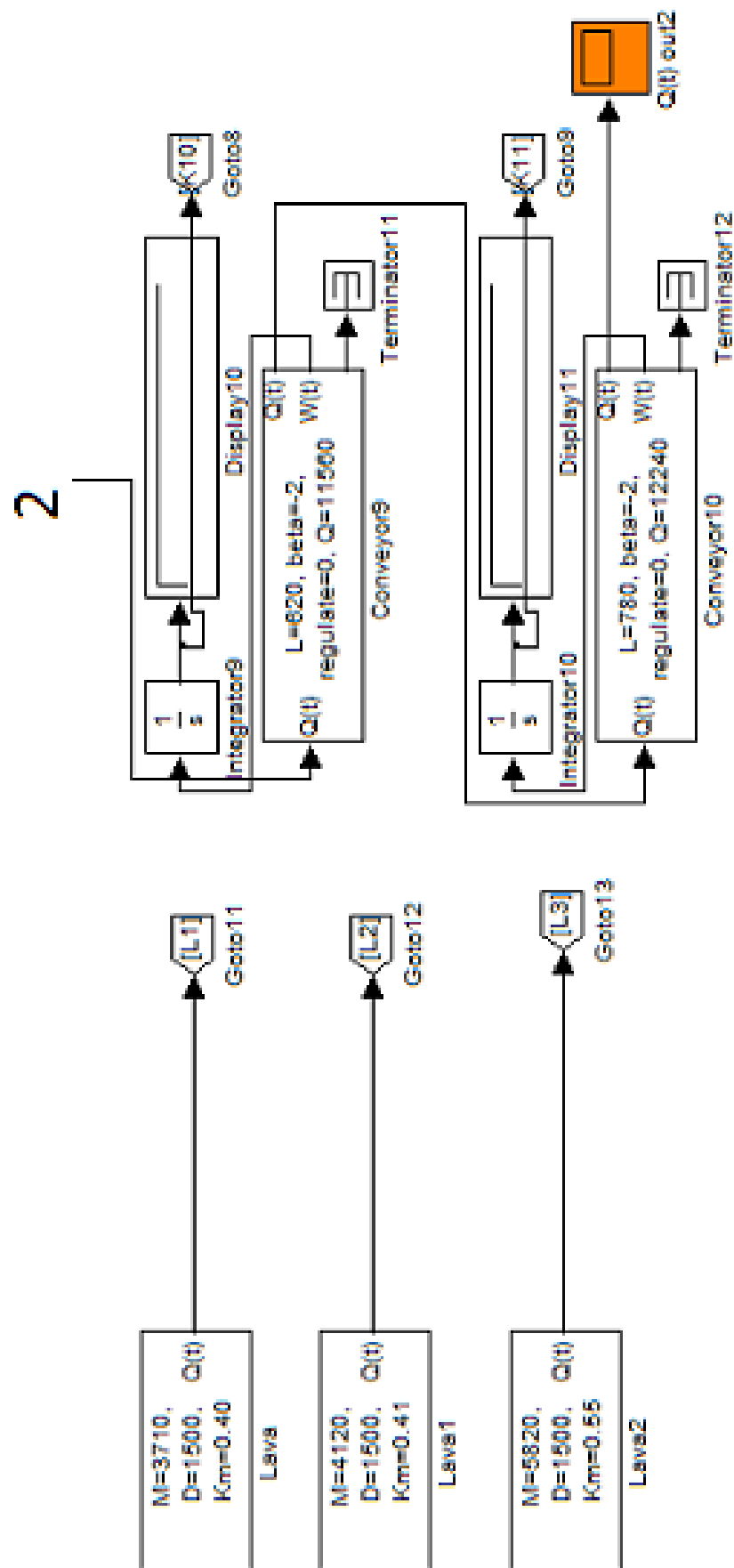


Рис. 4.1.1. Завершения



Таблиця 4.1

## Технічні дані конвеєрів

Тип конвеєра	Тип двигуна	$P_n$ , кВт	$\cos\varphi$	ККД, %	Довжина конвеєра, м	Швидкість руху стрічки, м/с	Кут, град	Продуктивність, т/год
<b>4-й "біс" східний магістральний конвеєрний штрет</b>								
2ЛТП1000КС П	ЭДКОФ-53/4	2x110	0,88	92,5	400	2,0	-8	710
2ЛТП1000КС П	2xЭДКОФВ250LB4	2x110	0,85	93,4	1050	2,0	-1	710
<b>4-й західний магістральний конвеєрний штрет</b>								
2ЛТ80КСП №2	2xЭДКОФВ250М-4	2x55	0,85	92,5	640	2,5	-1	510
2ЛТ80КСП №1	2xЭДКОФВ250М-4	2x55	0,85	92,5	640	2,5	-1	510
<b>Магістральний конвеєрний штрет пл. С1</b>								
1Л1000УД	2ВР-280М-6	2x90	0,87	97,0	400	1,0	-1	355
2Л100У	2ЭДКОФВ250LB6 2ЭДКОФВ250LB4	75 110	0,82 0,85	92 93,4	780	1,0	-1	340
<b>2-й західний магістральний конвеєрний штрет</b>								
1Л100У	ВР-280S-4	110	0,9	93,8	220	1,0	1	340
<b>5-й західний магістральний конвеєрний штрет</b>								
2ЛТП1000КС П	ЭДКРВ250LC4	132	0,86	94	290	2,5	0	850
<b>5-й західний магістральний конвеєрний штрет, конвеєрний квершлаг №2</b>								
2ЛТП1000КС П	2xЭДКРВ250LC4	2x132	0,86	94	320+ 700	2,5	0	850
<b>Магістральний конвеєрний штрет пл. С5</b>								
2Л100У	ВАО-315S6	110	0,87	93,5	620	2,0	-2	680
2Л120	2xВАО2-315M4	2x250	0,89	94,6	780	1,5	-2	720
<b>1-й східний магістральний конвеєрний штрет пл. С8</b>								
2ЛТП1000КС П	2xЭДКОФВ-53/4	2x110	0,88	92,5	440	2,0	-1	710
<b>Східний конвеєрний квершлаг пл. С5-С8</b>								
2ЛТП1000КС П	2xВР-250-S4	2x110	0,9	93,8	640	2,0	-8	710
1Л100У	ВР-250-S4	75	0,89	92,0	175	2,0	-8	680
<b>1-й східний магістральний конвеєрний штрет</b>								
1Л100У	2x2ВР-280S-6	2x75	0,86	93,2	650	2,0	-1	680
1Л100У	2x2ВР-280S-6	2x75	0,86	93,2	650	2,0	-1	680
1Л100У №2	2x2ВР-280S-6	2x75	0,86	93,2	600	2,0	-1	680
1Л100У №1	2x2ВР-280S-6	2x75	0,86	93,2	590	2,0	-1	680
<b>Конвеєрний вугільний квершлаг</b>								
2ЛУ120	2xВАО2-315M4	2x250	0,89	94,6	740	2,5	3	1260
<b>Нахилений конвеєрний квершлаг</b>								
1Л120	ВАО2-315M4	250	0,89	94,6	260	2,5	10	1260

Імітаційна модель скомпонована з наведених блоків для конвеєрів УКТ-2 (ділянок конвеєрного транспорту): конвеєра 4-го східного і західного магістральних конвеєрних штреків, штреку пл. С1 і С5, 5-го та 2-го ЗМКШ.

Головною особливістю наведеної імітаційної моделі є можливість моделювання роботи конвеєра в двох режимах: з постійною швидкістю руху стрічки та зі швидкістю руху стрічки, пропорційною вхідному вантажопотоку на конвеєрі. Це передбачено з метою спостереження за величиною електроспоживання окремих конвеєрів та всієї шахтної транспортної мережі при двох зазначених режимах їх роботи.

Моделювання виконуємо для 10-ти змін. Регулювання швидкості руху стрічки здійснюємо на конвеєрах згідно з варіантами:

1. Схема без регулювання швидкості руху стрічки.
2. Регулювання швидкості руху стрічки виконуємо тільки на послідовно встановлених конвеєрах, що транспортують вугілля з однієї лави.
3. Регулювання швидкості руху стрічки збірних конвеєрів.
4. Регулювання швидкості руху стрічки всіх конвеєрів.

Отримані за допомогою імітаційної моделі результати зведені до таблиці 4.2, з якої випливає, що зниження витрат електроенергії при встановленні засобів підвищення енергоефективності спостерігається за всіма пропонованими варіантами. Однак найбільше зниження витрати електроенергії спостерігається при встановленні перетворювачів частоти на послідовно розташованих конвеєрах, що транспортують вугілля з однієї лави.

Таблиця 4.2

Показники електроспоживання магістрального конвеєрного транспорту ш. "Павлоградська" при встановленні засобів регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки (та без них) за варіантами

Варіанти	Електроспоживання, кВт·год/ зміна
1	3227,59
2	2039,03
3	2571,91
4	1351,66

На рис. 4.12 – 4.14 наведені графіки, побудовані за результатами імітаційного моделювання системи магістрального конвеєрного

транспорту ш. "Павлоградська". На рисунку 4.12 розглянуто змодельований з інтервалом одна хвилина вантажопотік з очисного вибою за одну зміну.

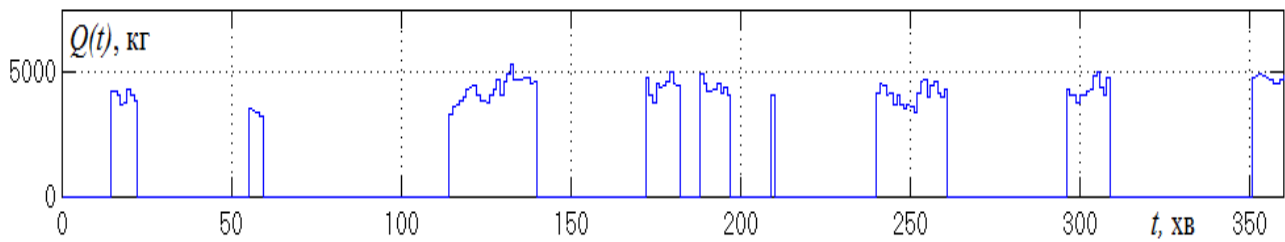


Рис. 4.12. Графіки імітаційного моделювання вантажопотоку, що рухається з лави 414 з інтервалом хвилина

Після конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки вантажопотік вирівнюється, що видно на рис. 4.13 та 4.14.

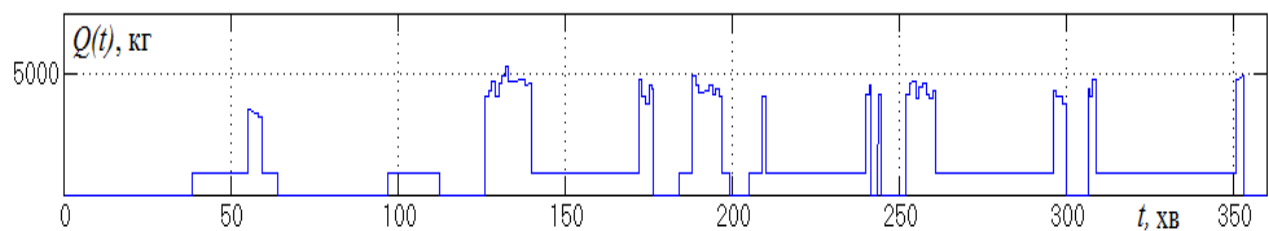


Рис. 4.13. Графіки імітаційного моделювання вантажопотоку після конвеєра 2ЛТ80КСП №2 з регульованою швидкістю руху стрічки

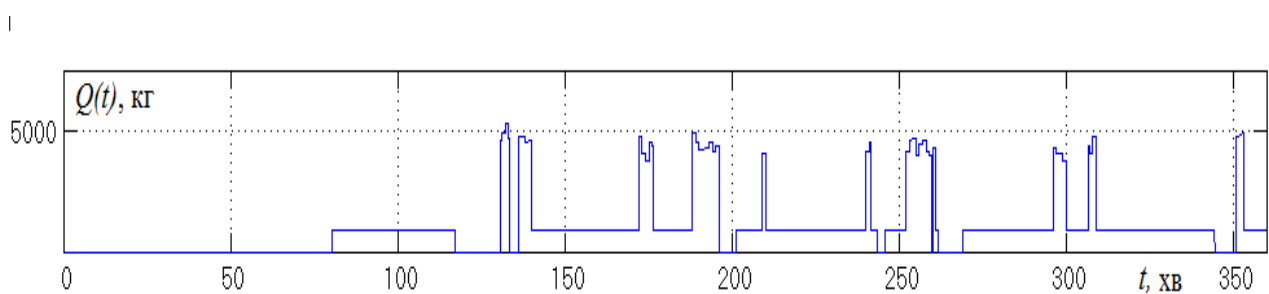


Рис. 4.14. Графіки імітаційного моделювання вантажопотоку після двох конвеєрів 2ЛТ80КСП №2 и №1 з регульованою швидкістю руху стрічки

Коефіцієнт машинного часу вантажопотоку після проходження кожного конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки зростає. При цьому величина електроспоживання першого конвеєра у лінії з

регульованою швидкістю руху стрічки за зміну склала 75,9 кВт·год, а другого – 71,8 кВт·год. Графіки хвилинного електроспоживання конвеєрів зображені на рис. 4.15 та 4.16.

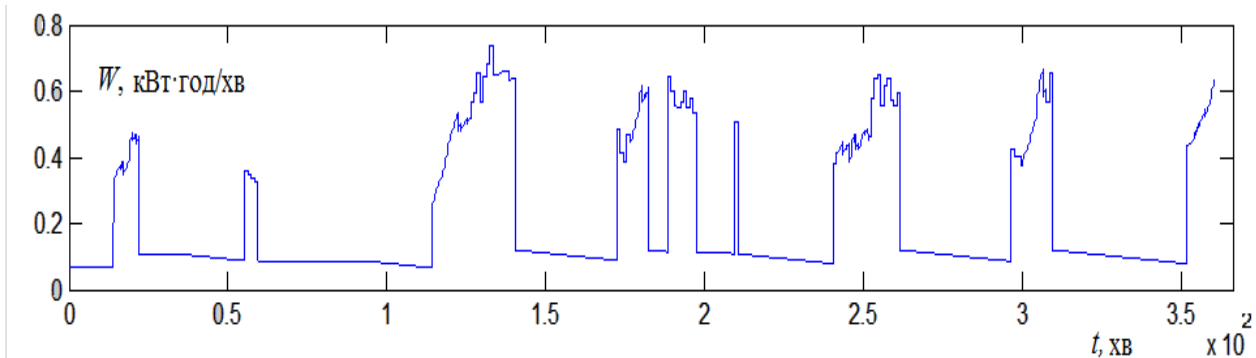


Рис. 4.15. Графіки імітаційного моделювання електроспоживання конвеєра 2ЛТ80КСП №2 з регульованою швидкістю руху стрічки

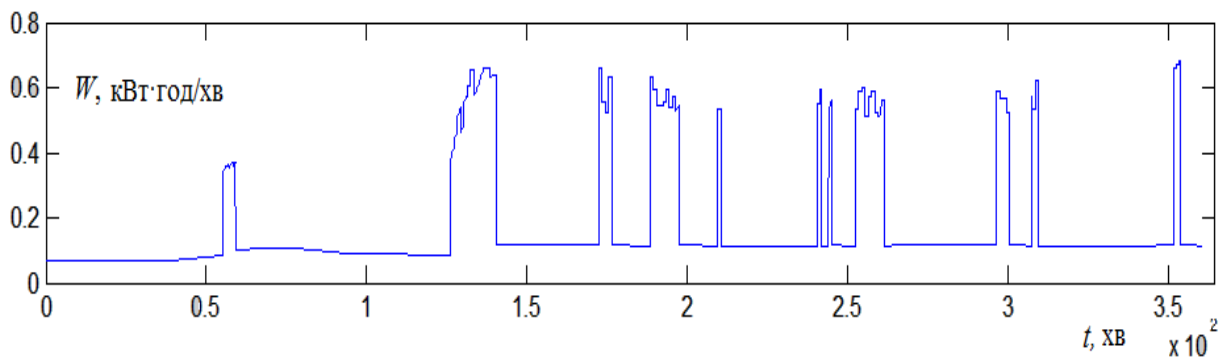


Рис. 4.16. Графіки імітаційного моделювання електроспоживання конвеєра 2ЛТ80КСП №1 з регульованою швидкістю руху стрічки

Питому витрату електроенергії можна отримати для змінних значень, зіставивши графіки на рис. 4.13 – 4.16 за відповідні моменти часу.

Як бачимо, зменшення величини електроспоживання спостерігається на наступному встановленому у лінії конвеєрі внаслідок перерозподілу вантажопотоку.

## 5. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ДОДАТКОВОГО ЗНИЖЕННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ШВИДКОСТІ РУХУ КОНВЕЄРНИХ СТРІЧОК

Для обґрунтування прийнятих рішень виконаємо економічну оцінку зниження витрати електроспоживання шахтного магістрального конвеєрного транспорту при регулюванні швидкості руху стрічки.

У розд. 3.1 розглядаються переваги встановлення регульованого приводу у ланцюг конвеєрів. Визначимо економічний ефект для знову спроектованої ділянки шахтної конвеєрної мережі довжиною 1 км, де необхідно встановити магістральний конвеєр з урахуванням його оснащення регульованим приводом, а також при поділі цієї мережі на 2 – 7 конвеєрів, кожен з яких оснащений регульованим приводом.

Приймемо, що штрек – горизонтальний, а характеристики конвеєрів, що встановлюються, такі:  $q''_p = 9,2$  кг/м;  $q'_p = 20$  кг/м;  $q_l = 15$  кг/м;  $c' = 1,1$ ;  $\omega = 0,06$ ;  $\beta = 0^\circ$ ;  $v = 2$  м/с,  $L = 1$  км. На ланцюг конвеєрів надходить вугілля з однієї лави з такими статистичними характеристиками:  $\lambda = 0,25$ ,  $\mu = 0,164$ . Параметр  $M(Q)$  приймає крайні значення діапазону 3400 та 5300 кг/хв, а  $K_{ск}$  значення 0,1 та 0,25.

Розглянемо чотири варіанти для зіставлення:

1.  $M(Q) = 3400$  кг/хв,  $K_{ск} = 0,1$ ;
2.  $M(Q) = 5300$  кг/хв,  $K_{ск} = 0,1$ ;
3.  $M(Q) = 3400$  кг/хв,  $K_{ск} = 0,25$ ;
4.  $M(Q) = 5300$  кг/хв,  $K_{ск} = 0,25$ .

Параметр  $M(Q)$  визначає, а параметр  $K_{ск}$  впливає на динаміку вантажопотоків, що описано у п. 3.2.

Використовуємо рівняння (2.2) – (2.5) та залежності перерозподілу потоку після конвеєра з регульованим приводом (3.2) – (3.6). Визначимо математичне сподівання середньогодинної потужності, значення якої наведено у табл. 4.3.

На рис. 4.17 наведена діаграма електроспоживання конвеєрної лінії з регульованою швидкістю руху стрічки залежно від кількості конвеєрів у ній при  $M(Q) = 3400$  кг/хв,  $K_{ск} = 0,25$ .

Таблиця 4.3.

Математичне сподівання середньогодинної потужності при зміні кількості конвеєрів у лінії, а також величини  $M(Q)$  і  $K_{ск}$ .

Математичне сподівання вантажопотоку $M(Q)$ , кг/хв		Змінні умови			
		3400	5300	3400	5300
Глибина регулювання швидкості руху стрічки $K_{ск}$		0,1	0,1	0,25	0,25
Кількість конвеєрів у лінії		Математичне сподівання середньогодинної потужності, кВт			
Один конвеєр без регулювання швидкості руху	1	58,72	67,75	58,72	67,75
Кілька конвеєрів з регулюванням швидкості руху	1	24,85	45,75	32,40	59,65
	2	24,20	44,36	30,96	56,75
	3	23,86	43,65	30,02	54,90
	4	23,65	43,20	29,37	53,64
	5	23,53	42,97	29,05	53,05
	6	23,45	42,81	28,82	52,61
	7	23,39	42,69	28,65	52,29
% зниження витрати ЕЕ при збільшенні кількості конвеєрів від 1 до 7		5,88	6,69	11,57	12,34

Наприклад, при  $M(Q)=3400$  кг/хв,  $K_{ск}=0,25$  витрата електроенергії при збільшенні кількості конвеєрів з регульованою швидкістю руху стрічки від 1 до 7 знизиться на  $(32,4-28,65) \cdot 100/32,4 = 11,57$  %.

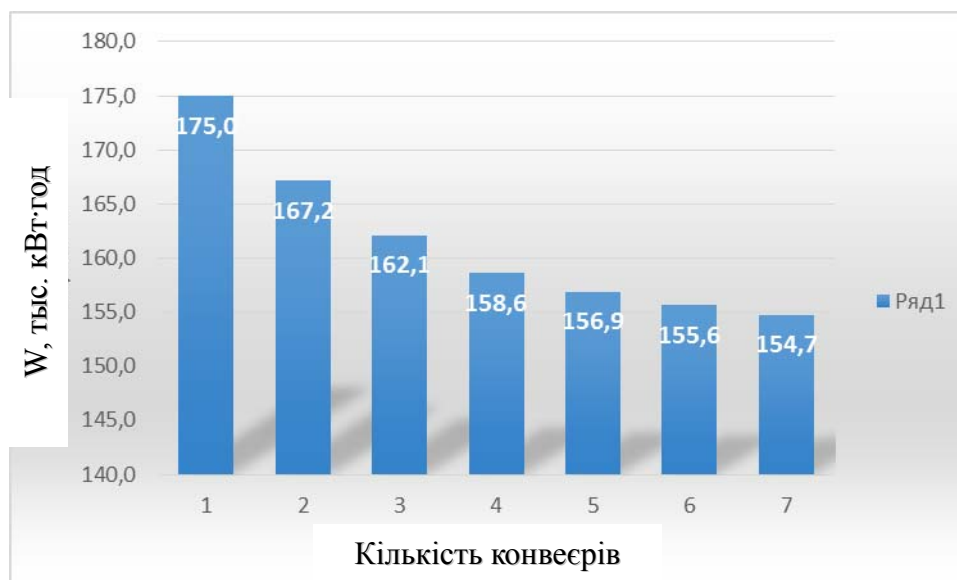


Рис. 4.17. Діаграма зміни величини річного електроспоживання ділянки конвеєрного транспорту з використанням перетворювачів частоти залежно від кількості конвеєрів у лінії довжиною 1 км

У табл. 4.4 наведені терміни окупності проектів при вартості однієї привідної станції 166 тис. грн. та одного перетворювача частоти 600 тис грн., а також числі послідовно встановлених конвеєрів не більше чотирьох, оскільки подальша тенденція очевидна.

Таблиця 4.4

Термін окупності проектів при розбитті конвеєрної лінії довжиною 1 км з регульованою швидкістю руху стрічки на кілька

Кількість конвеєрів	Змінні умови		
<b>Математичне сподівання вантажопотоку <math>M(Q)</math>, кг/хв</b>	<b>3400</b>	<b>5300</b>	<b>3400</b>
<b>Глибина регулювання швидкості руху стрічки <math>K_{ск}</math></b>	<b>0,1</b>	<b>0,1</b>	<b>0,25</b>
	Термін окупності, років		
1	4,19	6,45	5,39
2	8,22	12,13	10,22
3	12,21	17,66	14,83
4	16,18	23,11	19,33

З аналізу табл. 4.4 випливає, що при додаткових витратах на привідні станції і перетворювачі частоти термін окупності проекту при штучному поділі конвеєрної лінії на кілька частин є неприйнятним. Встановлення засобів регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки прийнятно або до вже існуючих конвеєрних ліній, або до проєктованих.

На рис. 3.7 наведена гістограма залежності питомої витрати електроенергії конвеєром з регулюванням швидкості руху стрічки від місця розташування його в транспортному ланцюжку. Порівняємо два випадки встановлення перетворювачів частоти: а) на конвеєри, які знаходяться в одній транспортній лінії і транспортують вугілля з однієї лави; б) на конвеєри, які транспортують вугілля з різних лав. Вважаємо всі параметри конвеєрів однаковими:  $q''_p = 9,2$  кг/м;  $q'_p = 20$  кг/м;  $q_l = 15$  кг/м;  $c' = 1,1$ ;  $\omega = 0,06$ ;  $\beta = 0^\circ$ ;  $v = 2$  м/с,  $L = 1$  км. Схематично ці варіанти розглянуті на рис. 4.18.

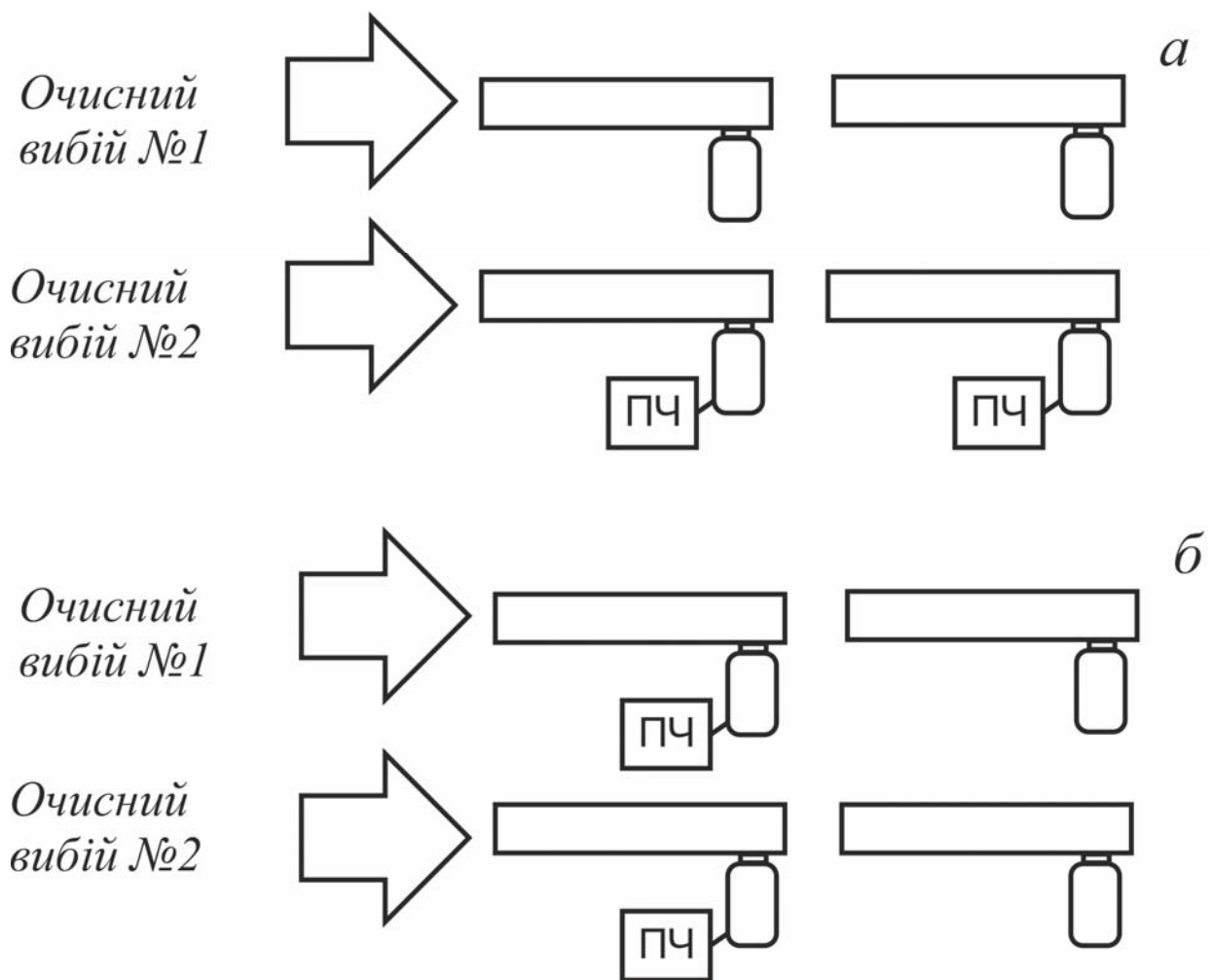


Рис. 4.18. Варіанти встановлення двох перетворювачів частоти на чотирьох конвеєрах в одній лінії *а* та в різних лініях *б*

Розрахунок річного зниження витрати електроенергії конвеєрів і прийнятої вартості електроенергії 1,02 грн/кВт·год виконано згідно з формулою (3.12).



Таблиця 4.5

Термін окупності проекту при різних варіантах установлення перетворювачів частоти

Установлення ПЧ за варіантами	Термін окупності, год
<i>a</i>	4,01
<i>б</i>	4,22

З аналізу результатів, наведених у табл. 4.5, випливає, що при обмеженій кількості перетворювачів частоти їх вигідніше застосовувати на послідовно встановлених конвеєрах.

Проаналізуємо економічний ефект, отриманий від застосування засобів регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки на ш. "Павлоградська". Визначимо термін окупності заходів згідно з варіантами, наведеними в табл. 4.2. У другому та третьому випадках встановлювалося по 7 перетворювачів частоти, кожен вартістю 600 тис. грн. У четвертому випадку встановлювалося 14 таких перетворювачів. З урахуванням цього розрахуємо простий термін окупності, не враховуючи банківський відсоток і інфляцію. Отримані результати зведемо до табл. 4.6.

Таблиця 4.6

Термін окупності варіантів при використанні засобів регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки на ш. "Павлоградська"

Варіанти	Термін окупності, років
1	—
2	3,27
3	5,93
4	4,15

Аналізуючи дані табл. 4.6 можна зробити висновок, що економічний ефект, отриманий у результаті використання перетворювачів частоти в ланцюзі конвеєрів вищий, ніж на збірних. Це пояснюється великим резервом для підвищення енергоефективності та додатковим зниженням електроспоживання в ланцюзі конвеєрів.

Оцінимо економічний ефект, отриманий при регулювання швидкості руху конвеєрної стрічки при наявності збірного бремс-бергового конвеєра. Вважаємо, що вугільна маса надходить з лав 1-4,

причому перші конвеєри з регульованою швидкістю руху стрічки встановлені під лавами і мають наступні параметри:  $q''_p = 9,2$  кг/м;  $q'_p = 20$  кг/м;  $q_l = 15$  кг/м;  $c' = 1,1$ ;  $\omega = 0,06$ ;  $\beta = 0$ ;  $v = 2$  м/с,  $L = 1$  км. Далі вантажопотік приймає збірний конвеєр. Його параметри:  $q''_p = 9,2$  кг/м;  $q'_p = 20$  кг/м;  $q_l = 15$  кг/м;  $\omega = 0,006$ ;  $c' = 1,1$ ;  $L = 1000$  м;  $\beta = -6$  град;  $v = \text{var}$  м/с – швидкість стрічки, яка пропорційна кількості підсумовуваних вантажопотоків: для одного потоку швидкість 1 м/с, для двох 2 м/с і т. д. Це необхідно для забезпечення приймальної здатності відповідної кількості вантажопотоків.

Зниження витрати електроенергії для одного конвеєра з регульованою швидкістю руху стрічки складе 182,9 тис. кВт·год/рік. Термін окупності при вартості перетворювача 600 тис. грн – 3,28 року. З урахуванням додаткового зниження електроспоживання бремсбергового конвеєра економічний ефект збільшиться, термін окупності відповідно знизиться (см. табл. 4.7).

Таблиця 4.7

Результати розрахунку терміну окупності розглянутих варіантів при впровадженні регульованого приводу і наявності збірного бремсбергового конвеєра

Кількість лав, з яких надходить вугілля	1	2	3	4
Витрати на встановлення перетворювачів частоти, тис. грн	600	1200	1800	2400
Річне зниження витрат на споживання електроенергії конвеєрами з регульованою швидкістю руху стрічки, тис. грн	182,9	365,8	548,7	731,6
Річне зниження витрат на споживання електроенергії конвеєрами з регульованою швидкістю руху стрічки і бремсберговим конвеєром, тис. грн	249,4	473,6	635,8	812,8
Термін окупності проекту, років	2,41	2,53	2,83	2,95

Аналізуючи отримані результати терміну окупності проекту, можна зробити висновок, що він істотно знижується за наявності збірного бремсбергового конвеєра з кутом установлення більшим  $-6^\circ$ . Запропонований алгоритм у сукупності з непрямим методом визначення характеристик потоків вугілля, що надходить з очисних вибоїв, дозволяє в реальному часі оцінювати енергоефективність роботи конвеєрів і керувати процесами транспортування вугілля, в

тому числі за мінімумом витрати електроенергії, наприклад, засобами регульованого приводу. Розроблені алгоритми та їх реалізація в середовищі MATLAB SIMULINK дозволяють моделювати систему конвеєрного транспорту вугільної шахти будь-якої складності, включаючи конвеєри з регулюванням швидкості руху стрічки для визначення енергоефективних режимів роботи транспортної системи. Економічний ефект від упровадження перетворювачів частоти до приводів конвеєрів збільшується при використанні регулювання швидкості руху стрічки на лінії послідовно встановлених конвеєрів, а також за наявності збірного бремсбергового конвеєра. При регулюванні швидкості руху стрічки на послідовно встановлених конвеєрах термін окупності проекту збільшується на 5 % у порівнянні з конвеєрами з регульованою швидкістю руху стрічки, що приймають вугілля з різних очисних вибоїв.

За наявності бремсбергового конвеєра з кутом установлення більшим  $-6^\circ$ , після конвеєрів з регульованою швидкістю руху стрічки економічний ефект від впровадження перетворювачів частоти збільшується за рахунок зниження витрат електроенергії на бремсберговому конвеєрі. При цьому термін окупності проекту зменшується до 40 % залежно від умов роботи конвеєрів. Збільшення кількості послідовно встановлених конвеєрів з регульованим приводом в лінії певної довжини, в порівнянні з одним конвеєром з регульованою швидкістю руху стрічки тієї самої довжини, дозволяє додатково знизити витрату електроенергії до 12 %.

## ВИСНОВКИ

У монографії викладено науково-практичні результати підвищення енергоефективності магістрального конвеєрного транспорту шляхом встановлення закономірностей впливу динаміки вантажопотоків та швидкості руху стрічки на споживання електричної енергії транспортною системою вугільної шахти.

Нормативні значення питомої витрати електроенергії як критерію для визначення енергетичної ефективності роботи конвеєрної лінії і системи транспорту в цілому повинні приводитися до умов роботи конвеєра, враховуючи поправку на кут установлення, масу рухомих частин і коефіцієнт опору руху стрічки. Тому мінімально досяжна витрата електроенергії для кожного конвеєра має специфічне значення, а визначення можливого резерву зниження електроспоживання вимагає врахування технологічних умов роботи конкретного конвеєра.

Регулювання швидкості руху стрічки на послідовно встановлених конвеєрах дозволяє знизити витрату електроенергії у напрямку вантажопотоку на кожному наступному конвеєрі за рахунок роботи кожного наступного конвеєра більш тривалий час на мінімальній швидкості.

Раціональне розміщення перетворювачів частоти доцільно визначати з урахуванням динаміки вантажопотоків та зміни їх характеристик регулюванням швидкості руху стрічок. Розроблена імітаційна модель системи шахтного конвеєрного транспорту дозволяє визначати витрату електроенергії конвеєрами з урахуванням динаміки вантажопотоків та регулювання швидкості руху стрічок систем шахтного транспорту будь-якої складності, що сприятиме підвищенню їх енергоефективності.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рудничный транспорт и механизация вспомогательных работ / Под ред. Б. Ф. Братченко. – М.: Недра, 1978. – 423 с.
2. Бурчаков А.С. Выбор рациональных технологических схем угольных шахт / А.С. Бурчаков, В.А. Харченко, Л.Н. Кафорин. – М. : Недра, 1975. – 271 с.
3. Ленточные конвейеры в горной промышленности / В.А. Дьяков, Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев, и др. ; Под редакцией чл.-кор. АН СССР А.О. Спиваковского. – М. : Недра, 1982. – 349 с.
4. Коновалов В.С. Определение областей применения и основных параметров многоприводных ленточных и ленточно-канатных конвейеров для транспортирования массовых сыпучих грузов на дальние расстояния: НИ-4022-4023 / В.С. Коновалов, В.Ф. Качанов. – [ВНИИПТМАШ]. – М., 1963.
5. Опыт эксплуатации ленточных конвейеров и конвейерных лент на угольных шахтах / М.А. Котов, Ю.И. Григорьев, Г.А. Загорский, и др. – М. : изд. ЦНИЭИ Уголь, 1970. – 91 с.
6. Система учета и контроля расхода электроэнергии для угольных шахт / Г.Г. Пивняк, В.В. Ткачев, В.Т. Заика, А.А. Шишацкий, В.В. Надточий, Ю.Т. Разумный. // Промышленная энергетика, 1992. – № 7. – С. 19 – 21.
7. Заїка В.Т. Моделі для довгострокового та оперативного управління ресурсо- і електрозбереженням на вугільних шахтах / В.Т. Заїка // Вісн. ДУ “Львівська політехніка”. – Електроенергетичні та електромеханічні системи. 1997. – № 340. – С. 47– 51.
8. Заїка В.Т. Регулировочная способность электроприемников в составе технологических звеньев угольной шахты и способы ее реализации для управления электросбережением / В.Т. Заїка // Гірничя електромеханіка та автоматика: Межвед. науч.-техн. сб. 1998. – Вып. 1(60). – С. 35 – 40.
9. Малиновский А.К. Автоматизированный электропривод машин и установок шахт и рудников: Учебник для вузов / А.К. Малиновский – М. : Недра, 1987. – 277 с.
10. Пивняк Г.Г. Новые способы и проекты повышения эффективности электроэнергетического комплекса угольной шахты / Г.Г. Пивняк, Ю.Т. Разумный, В.Т. Заика // Науковий вісник НГА

України. – Дніпропетровськ: [НГА України] – 1999. – № 6. – С. 95–104.

11. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт / Г.Г. Пивняк, И.П. Ремизов, С.А. Саратикянс и др.; Под ред. Г.Г. Пивняка. – М. : Недра, 1990. – 245 с.

12. Прокуда В.Н. Исследование и оценка грузопотоков на магистральном конвейерном транспорте ПСП «Шахта «Павлоградская» ПАО ДТЭК «Павлоградуголь» / В.Н. Прокуда, Ю.А. Мишанский, С.Н. Проценко // Гірничя електромеханіка. – 2012. – № 88. – С. 107-111.

13. Заика, В. Т. Методы повышения эффективности электроснабжения и энергоиспользования подземных горных машин и установок угольных шахт: Дис. д-ра техн. наук: 05.09.03 / [Национальная горная академия Украины]. – Днепропетровск, 2001. – 350 с.

14. Транспорт на горных предприятиях / Б.А. Кузнецов, А.А. Ренгевич, В.Г. Шорин, Н.Я. Биличенко, К.И. Бахурин, А.М. Варшавский, В.И. Тарасов; под общ. ред. Б. А. Кузнецова. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Недра, 1976. – 551 с.

15. Кузнецов Б.А. Динамика пуска длинных ленточных конвейеров. / Б.А. Кузнецов // Транспорт шахт и карьеров. – М. : Недра, 1971.

16. Шахмейстер Л.Г. Динамика грузопотоков и регулирование скорости конвейеров / Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев, А.К. Лобачева. – М. : Недра, 1972. – 106 с.

17. Шахмейстер Л.Г. Тяговые расчеты ленточных конвейеров / Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев – М. [МГИ], 1969. – 108 с.

18. Шахмейстер Л.Г. Вероятностные методы расчета транспортирующих машин / Л.Г. Шахмейстер. – М., 1983. – 312 с

19. Кариман С.А. Моделирование и оптимизация производственных процессов при добыче угля / С.А. Кариман, А.В. Брайцев, В.М. Шрамко. – М. : Изд-во "Наука", 1975. – 135.

20. Петков О. Н. Разработка и исследование системы автоматического управления скоростью ленточного конвейера по входному грузопотоку: автореф. дис. на сосиск. уч. степени канд. техн. наук: спец. 05.13.07 "Автоматизация процессов управления"/ О.Н. Петков – Москва, 2007. – 20 с.

21. Разумний Ю.Т. Енергозбереження / Ю.Т. Разумний, В.Т. Заїка, Ю.В. Степаненко. – Дніпропетровськ: [НГУ], 2008. – 164 с.

22. Николаев А.К. Проблемы эксплуатации конвейерного транспорта на рудоперерабатывающих заводах Республики Куба / А.К. Николаев, К.А. Васильев. и др. // Горное оборудование и электромеханика. – Издательство «Новые технологии». – 2008. – №1. – С. 78-80.

23. Монастырский В. Ф. Снижение энергозатрат при транспортировании насыпных грузов с помощью управления скоростью ленты конвейера / В.Ф. Монастырский, В.Ю. Максютенко, Р.В. Кирия, И.А. Бужинский // Науковий вісник НГУ. – Дніпропетровськ. – 2007. – №10. – С. 35 – 37.

24. Shirong Zhang, Xiaohua Xia, Optimal control of operation efficiency of belt conveyor systems (2010), Applied Energy Publ., vol. 87, pp. 1929 – 1937. url: <http://www2.ee.up.ac.za/~xxia/APEN2010.pdf>

25. G. Lodewijks, D. L. Schott and Y. Pang Energy saving at belt conveyors by speed control, (2011) In s.n. (Ed.), Proceedings of the 16th beltcon conference (pp. 1-10). Fourways: Imhc. url: <http://www.beltcon.org.za/docs/B16-12.pdf>

26. Lauhoff H. Speed Control on Belt Conveyors – Does it Really Save Energy? (2005) Bulk Solids Handling Publ.; 25(6), pp. 368 – 377.

27. Проценко С.Н. Снижение энергопотребления на конвейерном транспорте угольных шахт / С.Н. Проценко // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2008. – Вип. 81. – С. 31 – 40.

28. Разумный Ю.Т. Повышение энергоэффективности конвейерного транспорта угольных шахт / Ю.Т. Разумный, А.В. Рухлов, А.В. Козарь // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2006. – Вип. 76. – С. 24 – 28.

29. Монастырский В.Ф. Оптимизации энергоемкости транспортирования насыпных грузов ленточными конвейерами / В.Ф. Монастырский, С.В. Монастырский, Р.В. Кирия // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М. : [МГГУ]. – 2008. – №11. – С. 304 – 309.

30. Монастырский В.Ф. Эффективность работы ленточных конвейеров на горных предприятиях / В.Ф. Монастырский, В.Ю. Максютенко, Р.В. Кирия // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. — Днепропетровск: [ИГТМ НАНУ], 2010. — Вип. 88. — С. 185-191.

31. Разумний Ю.Т. Режими електроспоживання вугільних шахт: навч. Посібник / Ю.Т. Разумний – Діпропетровськ, [Національна гірнича академія України], 2002. – 126 с.

32. Михэль Заклика БСС БАРТЕК Завод Менден/Германия, Мечислав Колек CARBO-BARTEC S.z/Польша, Станислав Тытко KWK «ANNA»/Польша, Ленточные конвейеры с регулируемой скоростью. [Електронний ресурс] – Режим доступу до даних: [www.bartec.kz/files/mining/for-conveyance.pdf](http://www.bartec.kz/files/mining/for-conveyance.pdf)

33. Лобачева А.К. Энергетические показатели конвейерного транспорта с регулируемой и нерегулируемой скоростью / А.К. Лобачева // Транспорт шахт и карьеров; под общ. ред. чл.-корр. АН СССР А.О. Спиваковского. – М., 1971. – С. 158 – 163.

34. Полунин, В.Т. Эффективность регулирования скорости шахтных конвейеров / В.Т. Полунин // Научные труды МГИ. М.: [МГИ], 1968. – №53. – с. 87–95.

35. Костюк В.С. Регулируемый электропривод шахтных установок: Учебное пособие / В.С. Костюк, Л.П. Волкова, В.Н. Фащиленко – М. : [МГИ], 1984. – 65 с.

36. Эффективное использование электроэнергии и топлива в угольной промышленности / Н.И. Волощенко, Э.П. Островский, В.И. Мялковский и др. Под ред. Э.П. Островского, Ю.П. Миновского. – М.: Недра, 1990. – 407 с.

37. Техничко-економическое обоснование внедрения частотно-регулируемого электропривода ленточных конвейерных установок. / Т.С. Камалов., О.З. Тоиров [Восемнадцатая Всероссийская научно-техническая конференция "Энергетика: эффективность, надежность, безопасность "] – Томск., – 2012. [Електронний ресурс] – Режим доступу до даних: [www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2012/C15/021.pdf](http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2012/C15/021.pdf)

38. Браславский И.Я. Энергосберегающий асинхронный электропривод: учеб. пособие / И.Я. Браславский, З.Ш. Ишматов, В.Н. Поляков; под. ред. И.Я. Браславского. – М. : АСАДЕМА, 2004. – 202 с.

39. Економічне обґрунтування діапазону регулювання швидкості конвеєрних установок в умовах енергозберігаючої стратегії гірничо-збагачувальних комбінатів / Ю.Г. Осадчук, Г.В. Крутов, О.І. Савицький, Є.Д. Саприкін, О.І. Кочубей, В.В. Вольщиков // Вісник КНУ – Кривий Ріг, 2014. – Випуск 36. – С. 19 – 23. [Електронний ресурс] – Режим доступу до даних: [journal.knu.edu.ua/vknu\\_36.pdf](http://journal.knu.edu.ua/vknu_36.pdf).



40. Каталог продукции УкрНИИВЭ. [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: [ukrniive.com.ua/download/katalog\\_ukrniive.pdf](http://ukrniive.com.ua/download/katalog_ukrniive.pdf)

41. Компания BARTEC [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: <http://bartec.ua/> .

42. Сажин Р.А. Автоматизация технологических процессов горного производства: учеб. пособие / Р.А. Сажин. – Пермь: Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2009. – 138 с.

43. Межотраслевые правила по охране труда при эксплуатации промышленного транспорта (конвейерный, трубопроводный и другие транспортные средства непрерывного действия) : ПОТ Р М-029-2003. – М. : «Издательство НЦ ЭНАС», 2003. – 48 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: [http://ohranatruda.ru/ot\\_biblio/normativ/data\\_normativ/41/41961/](http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/41/41961/)

44. Стадник Н.И. Об использовании самовентилируемых двигателей в составе частотно-регулируемого электропривода ленточных конвейеров / Н.И. Стадник // Оптимізація виробничих процесів: зб. наук. пр.– 2013. – Вип. 14. – Севастополь, 2013. – С 22 – 26.

45. Тетерев Е.Д. Нагрузочная способность взрывозащищенных электродвигателей при питании от преобразователей частоты / Е.Д. Тетерев, С.В Чечельницкий, А.Ф. Дятлов // Уголь Украины. – 2008. – № 9. – С. 34 – 36.

46. Шахмейстер Л.Г. Динамика грузопотоков и регулирование скорости конвейеров / Л.Г. Шахмейстер, В.Г. Дмитриев, А.К. Лобачева. – М. : Недра, 1972. – 106 с.

47. Ставицкий В.Н. Алгоритм идентификации транспортной задержки конвейера / В.Н. Ставицкий // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Обчислювальна техніка та автоматизація”. – Донецьк : [ДонНТУ], 2011. – Випуск 20 (182). – С. 58 – 65.

48. Ставицкий В. Н. Динамика нагрузки регулируемого привода ленточного конвейера / В. Н. Ставицкий // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. Обчисл. техніка та автоматизація. – Донецьк, 2012. – Вип. 23. – С. 49 – 53.

49. Стадник Н. И. Частотно-регулируемый электропривод ленточных конвейеров на базе самовентилируемых двигателей / Н. И. Стадник // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. гірн.-електромех. – Донецьк, 2012. – Вип. 2. – С. 226–232.

50. Алотия Л.М. К вопросу о целесообразности регулирования скорости конвейеров в условиях шахт Карагандинского бассейна / Л.М. Алотия, Р.В. Мерцалов, Э.Г. Краус // "Механизация и автоматизация рудничного транспорта" – М. : Недра, [КНИУИ], 1965. – вып. 17.

51. Алотия Л.М. Технологические предпосылки ступенчатого регулирования скорости конвейеров в наклонных выработках шахт Карагандинского бассейна / Л.М. Алотия, Р.В. Мерцалов // "Вопросы развития и совершенствования рудничного транспорта" – М. : Недра, [КНИУИ], 1966. – вып. 22.

52. Кондрахин В.П. Статистический анализ эксплуатационных параметров шахтного ленточного конвейера / В. П. Кондрахин, Н. И. Стадник, П. В. Белицкий // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер. : Гірничо–електромеханічна. – 2013. – Вип. 2. – С. 140-150.

53. Типовое руководство по оборудованию и эксплуатации унифицированной телекоммуникационной системы диспетчерского контроля и автоматизированного управления горными машинами и технологическими комплексами (УТАС) в угольных шахтах (для Украины). : Руководящий нормативный документ Министерства топлива и энергетики Украины. – Донецк, 2004. – 100 с.

54. Научно-производственное предприятие Рудпромавтоматика [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: <http://www.rpa.ua/html/ru/products/index.php>

55. Система автоматизированного управления разветвленными конвейерными линиями САУКЛ [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: <http://www.instroyservis.com/index.php?page=saukl&lang=4>

56. Ткачев В.В. Разработка системы передачи информации для подземных условий / В.В. Ткачев, Ю.А. Аврахов, Д.А. Поперечный, П.Ю. Огеенко, Н.В. Козарь // Збірник наукових праць НГУ. – Дніпропетровськ: [РВК НГУ], 2004. – № 19. – Том 2. – С. 20 – 27.

57. Кирия Р. В. Об определении коэффициента сопротивления движению ленты конвейера по роликоопорам / Р. В. Кирия, Т. Ф. Мищенко, Р. Г. Павленко // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / [ИГТМ НАН Украины]. – Днепропетровск. – 2003. – Вып. № 47. – С. 98 – 107.

58. Заика В.Т. Модели для контроля энергетической эффективности шахтных магистральных конвейерных установок /

В.Т. Заика // Науковий вісник НГА України. – Дніпропетровськ: [РВК НГА України] – 2000. – № 2. С. 72 – 77.

59. Современная теория ленточных конвейеров горных предприятий / В. И. Галкин, В. Г. Дмитриев, В. П. Дьяченко [и др.]. – М.: [МГГУ], 2005. – 543 с.

60. Конвеєри шахтні стрічкові. Вимоги до проектування, монтажу, технічного обслуговування та ремонту. : СОУ 10.1.00185790.004-2006. : Стандарт мінвуглепрому України. – Введ. 06-11-06. – Київ: Мінвуглепром, 2006. – 95 с.

61. Конвейеры ленточные шахтные. Методика расчета. : ОСТ 12.14.130-79. : Минуглепром СССР. – Введ 1981-01-01. – М., 1980. – 70 с.

62. Нормирование топливно-энергетических ресурсов и регулирование режимов энергопотребления / Под ред. В.В. Дегтярева. – М.: Недра, 1983. – 244 с.

63. Енергозбереження. Методи визначення норм витрат електроенергії гірничими підприємствами: ДСТУ 3224-95 – Введ. 1997-07-01. – Київ: Мінвуглепром, 2006. – 88 с.

64. Енергобаланс вугільних підприємств. Аудит енергоспоживання. Інструкція. Стандарт Мінпаливенерго України. : СОУ 10.1.00174094.001-2004. – Введ. 2005-01-01. Наказ Мінпаливенерго України від 17-11-2004 № 726. – Київ, 2004.

65. Загорулько А.Д. Методика выполнения измерений массы твердого топлива, поступающего на тепловые электростанции, автоматическими конвейерными весами / А.Д. Загорулько, В.А.Кравчук, В.А.Катунин. – М.: СПО «Союзтехэнерго», 1990. – 9 с.

66. Кондрахин В. П. Измерение грузопотока на ленточном конвейере с помощью съёмного тензоизмерительного устройства с учётом натяжения ленты / В. П. Кондрахин, Н. И. Стадник, П. В. Белицкий // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Сер.: Гірничо-електромеханічна. – 2013. – Вип. 1. – С. 79–87. [Електронний ресурс] – Режим доступу до даних: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Npdntu\\_gir\\_2013\\_1\\_11.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Npdntu_gir_2013_1_11.pdf)

67. Гаврилов П.Д. Структура системы управления многоприводным ленточным конвейером / П.Д. Гаврилов, А.П. Носков // Горное оборудование и электромеханика. – 2009. – Вып. 3. – С. 18–21.

68. Створення новітніх систем енергозабезпечення, методу поглибленого непрямого енергомоніторингу вугледобувних

комплексів та технології діагностики стану дільничних вибухозахищених транс-форматорних підстанцій (КТПВ): звіт по НДР (проміж.): ГП-454/ ДВНЗ «Національний гірничий університет»; кер. С.І. Випанасенко; викон.: Ю.Т. Разумний, В.Т. Заїка, О.І. Хованська, Н.С. Дрешпак, А.В. Рухлов, Я.Г. Куваєв, О.Р. Ковальов, І.Б. Кольцов, А.С. Румянцев, П.В. Камишанський, Є.В. Кошеленко, І.М. Луценко, Д.О. Кошовий, Н.В. Іванова. – Д., 2012. – 241 с., 54 рис., 51 табл., 3 додатки, 51 джерел. – Бі-бліогр.: с. 132 – 139. – № ДР 0112U000873.

69. Разумный Ю.Т. Энергоэффективность магистрального конвейерного транспорта методом определения величин минутных значений угольного потока / Ю.Т. Разумный, В.Т. Заика, В.Н. Прокуда // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2014. – Вип. 93. – С. 139 – 143.

70. Патент на корисну модель №98766 Україна, МПК Е 21 С 41/00. Спосіб визначення енергоефективності магистрального конвеєрного транспорту / Ю.Т. Разумний (Україна), В.М. Прокуда (Україна); заявник та патентовласник ДВНЗ "Національний гірничий університет"; опубл. 12.05.15, № 9. – 3 с.: іл.

71. Альшиц, Г.И. Горные машины / Г.И. Альшиц – М.: Госгортехиздат. – 1961. – 491 с.

72. Смирнов Н.В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений / Н.В. Смирнов, Дунин-Барковский И.В. – М.: Наука, 1965. – 511 с.

73. Основные положения по проектированию подземного транспорта новых и действующих шахт. / – М.: [ИГД им. А.А. Скочинского], 1977. – 174 с.

74. Разумный Ю.Т. Формирование характеристик потока угля конвейерного транспорта по данным моделирования грузопотоков из очистных забоев / Ю. Т. Разумный, В. Т. Заика, В. Н. Прокуда // Наук. пр. Донец. нац. техн. ун-ту. Сер. Електротехніка і енергетика. – 2013. – Вип. 2. – С. 208-213.

75. Колб Ант. А. Теорія електроприводу: Навчальний посібник / Ант.А. Колб, А.А. Колб – Д.: [Національний гірничий університет], 2006 – 511 с.

76. Разумный Ю.Т. Эффективное использование электроэнергии та топлива: Навчальний посібник / Ю.Т. Разумный, А.В. Рухлов, В.М. Прокуда, Н.Ю. Рухлова; м-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Д.: [НГУ], 2014. – 223 с.

77. Заика В.Т. Влияние регулируемого привода на грузопотоки и энергоэффективность системы шахтного конвейерного транспорта / В.Т. Заика, Ю.Т. Разумный, В.Н. Прокуда // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2015. – №3. – С. 82-88.

78. Разумный Ю. Т. Анализ влияния регулирования скорости конвейерной ленты на энергоэффективность транспортных систем / Ю. Т. Разумный, В. Н. Прокуда // Уголь Украины. –2014. –№ 12. –С. 43-46.

79. Прокуда, В. Н. Синтез вероятностных моделей контроля энергоэффективности магистрального конвейерного транспорта угольных шахт / В. Н. Прокуда // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2014. – № 16. –С. 40 – 47.

80. Красс М.С. Математика для экономистов / М.С. Красс, Б.П. Чупрынов. – СПб. : Питер, 2005. – 464 с: ил.

81. Математический энциклопедический словарь / Гл. ред. Ю.В. Прохоров, Ред. кол.: С.И. Адян, Н.С. Бахвалов и др. – М.: Сов. Энциклопедия, 1988. –847 с.

82 Fu Zhang, Murali Yeddanapudi, Variable transport delay modeling mechanism, US8180608 B1 [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: <http://www.google.com.na/patents/US8180608>.

83. Mathworks. Accelerating the pace of engineering and science [Электронный ресурс] – Режим доступа до даних: <http://www.mathworks.com/help/simulink/>

## ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	3
1. ЕНЕРГЕТИКА СИСТЕМ КОНВЕЄРНОГО ТРАНСПОРТУ...	7
1.1. Фактори, що впливають на витрату електроенергії.....	7
1.2. Технічне забезпечення і системи керування.....	12
1.3. Напрямки зниження витрат електроенергії.....	19
2. ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОНВЕЄРНИХ УСТАНОВОК БЕЗ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ РУХУ СТРІЧКИ..	21
2.1. Обґрунтування критерію енергоефективності роботи конвеєрного транспорту.....	21
2.2. Аналіз методів визначення електроспоживання магістральних конвеєрних установок.....	28
2.3. Визначення хвилинних значень вантажопотоку, що прямують з очисного вибою.....	32
2.4. Закономірності розподілу можливих значень електроспоживання.....	39
3. МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ КОНВЕЄРІВ ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ШВИДКОСТІ РУХУ СТРІЧКИ.....	50
3.1. Вплив регульованого приводу на статистичні характеристики вантажопотоків у вузлах транспортної мережі.....	50
3.2. Підвищення енергоефективності транспортування вантажу магістральними конвеєрами при використанні регульованого приводу.....	61
3.3. Визначення місць установлення перетворювачів частоти в шахтній транспортній мережі.....	73
4. ІМІТАЦІЙНІ МОДЕЛІ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ РОБОТИ КОНВЕЄРНИХ ЛІНІЙ.....	80
4.1. Алгоритми визначення енергоефективності магістрального конвеєрного транспорту.....	80
4.2. Програмна реалізація моделей визначення енергоефективності.....	88

5. ЕКОНОМІЧНА ОЦІНКА ДОДАТКОВОГО ЗНИЖЕННЯ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАННЯ ПРИ РЕГУЛЮВАННІ ШВИДКОСТІ РУХУ КОНВЕЄРНИХ СТРИЧОК.....	101
--	-----

ВИСНОВКИ.....	108
---------------	-----

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	109
------------------------	-----

Наукове видання

**Разумний** Юрій Тимофійович  
**Прокуда** Володимир Миколайович

**ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ МАГІСТРАЛЬНОГО  
КОНВЕЄРНОГО ТРАНСПОРТУ ВУГІЛЬНИХ ШАХТ**

Монографія

Редактор Л.О. Чуїщева

Підписано до видання 25.02.2018.  
Електронний ресурс. Авт. арк. 6,7.

Підготовлено й видано  
у Державному ВНЗ "Національний гірничий університет".  
Свідectво про внесення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.  
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.